

# 基于模式投影抑制的无波前传感器双变形镜自适应光学系统解耦控制

刘文劲<sup>1\*</sup>, 许冰<sup>2,3</sup>, 孙文瀚<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>中国民用航空飞行学院航空电子电气学院, 四川 广汉 610308;

<sup>2</sup>中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209;

<sup>3</sup>中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209

**摘要** 为实现无波前传感器自适应光学系统中双变形镜的解耦控制, 本文提出了一种基于模式投影抑制的双变形镜解耦控制方法, 其中: 低空间分辨率大行程变形镜使用模式法进行控制, 用于低阶像差校正; 高空间分辨率变形镜用于校正高阶像差。同时, 通过投影抑制法消除高空间分辨率变形镜中的低阶校正分量, 进而实现两个变形镜的高效协同工作。理论分析与仿真结果表明, 相比传统的无波前传感器自适应光学系统的解耦算法, 本文所提解耦控制方法在稳定性、解耦计算的运算量上均有更优异表现, 并可实现良好的耦合误差抑制与像差校正效果。所提算法的有效性得到了原理性实验的验证。

**关键词** 自适应光学; 双变形镜; 解耦控制; 投影抑制

中图分类号 O436 文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL220548

## 1 引言

无波前传感器自适应光学系统具有结构简单、系统紧凑、成本低廉等诸多优势<sup>[1]</sup>, 而且在光强闪烁或光束近场强度分布不均的场景下依然具有一定的像差校正效果<sup>[2]</sup>, 因而被广泛应用于激光光束净化<sup>[3-5]</sup>、激光大气传输<sup>[6]</sup>、天文观测<sup>[7]</sup>、医疗成像<sup>[8]</sup>等领域, 成为自适应光学技术的重要组成部分。无波前传感器自适应光学系统无需使用波前传感器即可直接对波前像差进行测量, 而且一般使用优化控制算法, 依据远场评价指标对波前校正器控制信号进行迭代优化<sup>[9]</sup>, 最终完成像差校正。随着无波前传感器自适应光学技术应用的不断发展, 其面临的待校正像差时空特性日益复杂。为应对这一挑战, 要求自适应光学系统的核心器件——波前校正器, 同时具有大行程和高空间分辨率特性, 但现有工艺技术制备同时满足这两个特性的波前校正器较为困难。因此, 使用双变形镜构建自适应光学系统<sup>[10]</sup> (其中一块低空间分辨率大行程变形镜(Woofler), 如双压电片变形镜, 负责低阶像差补偿<sup>[11]</sup>, 而另一块高空间分辨率变形镜(Tweeter)负责其余高阶像差的补偿)是解决这一问题的有效途径, 十余年来受到了广泛关注并得到了广泛应用。

在这类双变形镜自适应光学系统中, 实现不同变形镜之间像差的解耦控制, 使两块变形镜高效协同工

作, 是发挥这类系统优势的关键。目前对有波前传感器自适应光学系统解耦控制的研究已较为成熟, 基于泽尼克(Zernike)模式的解耦控制<sup>[3,10,12]</sup>、区域解耦控制<sup>[13-14]</sup>、本征模解耦控制<sup>[15]</sup>、两步法<sup>[16-17]</sup>等先后在不同自适应光学系统上得到成功应用。相对而言, 对无波前传感器自适应光学系统解耦控制的研究相对较少。这主要是因为无波前传感器系统中没有波前传感器, 无法直接借助像差信息进行解耦。因此, 现有的解耦方法不论是全局优化法<sup>[18]</sup>, 还是模式分解法<sup>[3]</sup>或者基于电压重置<sup>[12]</sup>的解耦方法, 都难以在像差校正效果、耦合误差抑制、解耦稳定性及计算复杂度等方面同时取得较好效果。

为此, 本文提出了一种基于投影抑制的模式解耦控制算法。该算法使用模式法对 Woofler 进行控制, 同时对 Tweeter 的控制电压进行投影抑制, 消除了校正量中的低阶耦合分量, 从而消除了双变形镜的耦合误差, 使它们能够高效协同工作, 充分发挥了双变形镜在无波前传感器自适应光学系统中的性能优势。数值仿真与理论计算结果都证明了所提方法相比传统的模式分解法和电压整体重置法在像差校正效果和稳定性等方面的优势。最后通过原理性实验系统证明了该方法的有效性。

## 2 算法介绍

本文提出的双变形镜解耦方法的主要作用是实现

收稿日期: 2022-02-09; 修回日期: 2022-04-04; 录用日期: 2022-05-03; 网络首发日期: 2022-05-15

通信作者: \*wjliu5719@163.com

Woofers 与 Tweeters 对像差按模式进行分配,消除两个变形镜校正量之间的耦合分量。其中:Woofers 的控制信号按照模式法<sup>[18]</sup>进行生成,负责低阶像差的校正;Tweeters 的控制信号采用随机并行梯度下降(SPGD)算法<sup>[7]</sup>计算生成,但每次更新后使用本文提出的投影抑制法消除一次控制信号中对应的低阶校正分量,抑制两个变形镜校正量之间出现的耦合。因此,本文提出的解耦方法与具体的优化算法无关,无论是 SPGD 算法<sup>[18]</sup>、模拟退火算法<sup>[19]</sup>还是其他优化控制算法皆可使用本文提出的投影抑制法进行解耦控制。事实上,本文方法亦可用于基于深度学习的自适应光学系统<sup>[20]</sup>。

### 2.1 大行程变形镜解耦方法

对于 Woofers,使用模式法进行优化控制,即:不将变形镜电压信号作为待优化变量,而是将其需要校正的像差模式系数作为待优化变量。如果大行程变形镜都能够对低阶像差有良好的校正效果,则使用模式法进行控制。Woofers 产生的校正量必然以分配给 Woofers 校正的低阶像差为主,每一项待校正模式按照模式法生成的该项模式的均方根(RMS)与拟合该项模式的误差的比值确定,而且误差一般远小于该项模式的校正量。为此,首先需要构建出变形镜的模式系数到控制电压的转换矩阵,当需要加载控制信号到变形镜时,将优化后的模式系数转换为变形镜的控制电压。转换矩阵的求解方式如下:首先通过干涉仪或者波前传感器事先求得变形镜的影响函数,记  $S_i$  为变形镜的第  $i$  个驱动器的影响函数,  $Z_j$  为第  $j$  阶 Zernike 模式,则变形镜影响函数与 Zernike 模式之间的互相关矩阵  $C_{sz}$  可以表示成

$$C_{sz}(i, j) = \int S_i(r) Z_j(r) d^2 r. \quad (1)$$

同理,可以计算出变形镜影响函数的自相关矩阵  $C_{ss}$ ,

$$C_{ss}(i, j) = \int S_i(r) S_j(r) d^2 r. \quad (2)$$

此时,Zernike 模式系数与 Woofers 控制信号之间的转换矩阵  $W_{vz}$  为

$$W_{vz} = C_{ss}^{-1} C_{sz}, \quad (3)$$

式中:  $C_{ss}^{-1}$  为矩阵  $C_{ss}$  的逆矩阵。在控制时,使用 Woofers 待校正像差模式的模式系数  $z$  作为优化算法的优化对象,在每次需要加载控制电压至 Woofers 时,使用式(4)计算 Woofers 实际需要加载的电压  $V$ 。

$$V = W_{vz} \times z. \quad (4)$$

### 2.2 高空间分辨率变形镜解耦方法

为实现对 Tweeters 控制信号中低阶分量的抑制,首先需要计算出该变形镜的模式系数到控制信号之间的转换矩阵  $T_{zv}$ ,其计算方法与式(3)相同,然后求解其广义逆矩阵  $T_{zv}$ ,公式为

$$T_{zv} = T_{zv}^{-1}, \quad (5)$$

则计算结果  $T_{zv}$  为 Tweeters 的控制信号到模式系数的转换矩阵。

若优化算法每次更新的 Tweeters 控制电压信号为  $V_t$ ,则其对应的与 Tweeters 不需要校正的低阶模式系数  $z_t$  为

$$z_t = K \times T_{zv} \times V_t, \quad (6)$$

式中:  $K$  为一个对角矩阵,除了对角线上与变形镜不需要校正的像差模式阶次对应位置处的元素为 1 之外,其余位置处的元素全部为 0。则可知控制信号中与耦合校正量对应的控制信号  $V_c$  为

$$V_c = T_{zv} \times (K \times z_t). \quad (7)$$

因此,在每次加载控制信号之前,减去控制中的耦合分量,得到消除耦合的控制信号  $V_{id}$ ,将其作为实际加载的电压,就可以实现对耦合误差的抑制。计算过程为

$$V_{id} = V_t - V_c = V_t - T_{zv} \times K \times (T_{zv} \times V_t). \quad (8)$$

### 2.3 仿真验证及分析

为了验证该方法的有效性,构建如图 1 所示的仿真系统。使用一个 19 单元变形镜为 Woofers 补偿低阶像差(离焦、像散,即 Zernike 模式的第 3~5 项),同时使用一个 91 单元变形镜为 Tweeters 补偿高阶像差,将双边 SPGD 算法<sup>[18]</sup>作为系统的控制算法,将远场光斑的平均半径作为优化指标。在不同算法的对比仿真过程中,保证像差、SPGD 参数一致。

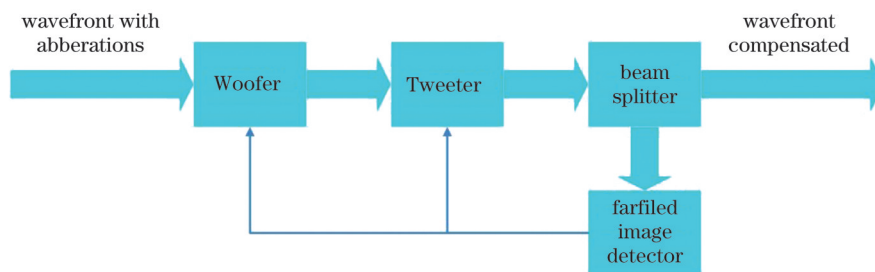


图 1 仿真系统示意图

Fig. 1 Schematic of simulation system

由于两个变形镜都使用模式法<sup>[3,18]</sup>进行控制不能充分发挥 Tweeters 的像差校正能力,校正效果低于 Tweeters 直接优化控制电压方法,而使用全局优化

法<sup>[18]</sup>则无法保证都耦合误差的抑制,因此,本文重点对比本文提出的投影抑制法与控制信号整体重置法<sup>[12]</sup>。整体重置法的具体原理如下:

该方法基于优化模式系数的方法对 Woofer 进行控制,与本文 2.1 节所述方法相同,但其通过能够消除控制信号中耦合分量的重置矩阵与控制信号相乘来去除 Tweeter 中的耦合分量。为了得到重置矩阵,在无波前传感器自适应光学系统中,应首先计算出 Tweeter 各驱动器影响函数中对应需要被抑制的模式分量的模式系数矩阵  $R_m$ 。如果 Tweeter 控制电压信号  $V_t$  中不包含需要被抑制的模式,则应有

$$0 = R_m V_{t_0} \quad (9)$$

然后将  $R_m$  乘以一个经验系数  $k$  之后,再与单位矩阵  $I$  (矩阵宽度为 Tweeter 驱动器个数) 按式 (10) 合并为一个矩阵。假定  $V_{tc}$  是 SPGD 每次迭代后得到的包含耦合分量  $\Delta V$  的控制信号,则  $V_{tc}$  可视为  $V_t$  与  $\Delta V$  之和,则

$$\begin{bmatrix} V_{tc} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_t + \Delta V \\ 0 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} I \\ kR_m \end{bmatrix} V_{t_0} \quad (10)$$

对矩阵计算广义逆,则有

$$V_t \approx \begin{bmatrix} I \\ kR_m \end{bmatrix}^+ \begin{bmatrix} V_t + \Delta V \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I \\ kR_m \end{bmatrix}^+ \begin{bmatrix} V_{tc} \\ 0 \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} V_{tc} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

其中,

$$C = \begin{bmatrix} I \\ kR_m \end{bmatrix}^+, \quad (12)$$

式中:矩阵  $C$  是实现控制信号进行整体重置从而消除耦合的重置矩阵。由上述计算过程可知单位矩阵具有保持 Tweeter 控制信号不变的作用,而经验参数  $k$  可

用于调节耦合消除的效果: $k$  值越大,重置矩阵越倾向于消除耦合,同时降低控制信号保持的效果; $k$  值越小,重置矩阵消除耦合的效果越弱,同时保持控制信号不变的效果增强。选取适当的参数  $k$  可以在尽量保持控制信号不变(保持变形镜像差校正效果)的同时消除耦合,经验参数  $k$  过小会导致耦合消除效果不佳,而经验系数  $k$  过大则会导致校正效果退化。算法性能依赖于经验参数  $k$  的选取。

接下来分别从像差校正效果、耦合误差抑制、解耦过程的稳定性、解耦过程中额外引入的计算量 4 个方面,对算法性能进行分析。

### 1) 像差校正效果

由整体重置法的原理可知,使用整体重置法进行耦合抑制的效果依赖于经验参数  $k$  的选择:经验参数过小将导致耦合无法得到充分抑制,无法发挥出双变形镜自适应光学系统的性能;经验参数过大将导致系统过于趋向抑制耦合,去除耦合过程的稳定性下降,校正效果出现退化。只有通过多次尝试选取合适的经验参数,才能使系统在像差校正与耦合抑制两方面都具有较好的性能。由图 2 可知,使用本文提出的投影抑制法进行解耦控制时,校正效果不依赖于经验参数的选择,整个解耦计算过程更为简洁,评价指标曲线和像差均方根(RMS)曲线都能够稳定收敛,即使是与经验参数选择适当的整体重置法相比,也能够取得更好的像差校正效果,相比经验参数选择过大的整体重置法,校正效果明显更优。

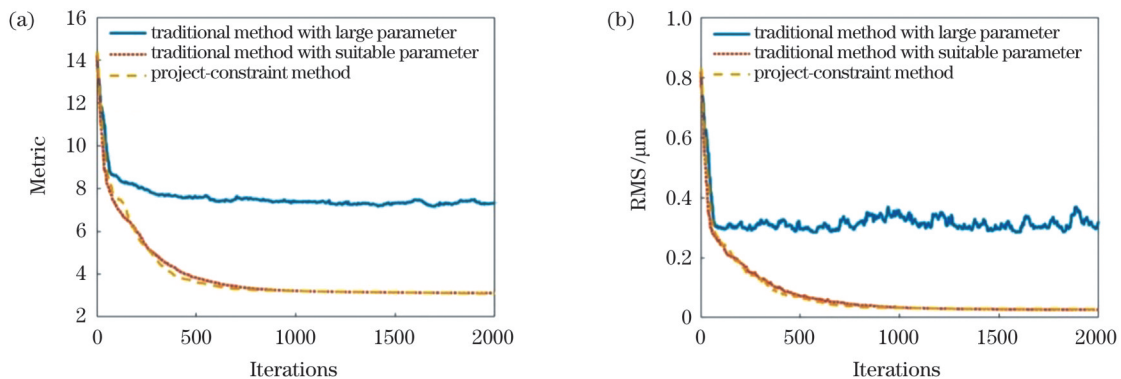


图 2 校正过程中的曲线。(a)校正过程中的评价指标曲线;(b)校正过程中的像差 RMS 曲线

Fig. 2 Curves during correction. (a) Metric curves during correction; (b) RMS curves of aberration during correction

### 2) 耦合误差抑制

用耦合系数作为衡量两个变形镜耦合程度的量化标准。耦合系数的计算公式为

$$r = \frac{\left| \iint S_w S_t ds \right|}{\sqrt{\iint S_w S_w ds} \sqrt{\iint S_t S_t ds}}, \quad (13)$$

式中: $S_w$ 、 $S_t$  分别为 Woofer、Tweeter 的像差补偿量。耦合系数的实质是  $S_w$  和  $S_t$  的方向余弦,在数学上表征了它们之间的相关性。耦合系数的大小在 0 到 1 之间,数值越小,表示  $S_w$  和  $S_t$  的相关度越低,则对应像差补

偿量之间的耦合程度越小<sup>[12]</sup>。

加强整体重置法的约束力度虽然可以降低耦合,但亦会加大解耦对像差校正效果的影响,只有当整体重置法中的经验参数选取适当时,系统才能在耦合抑制和像差校正效果上取得均衡。由图 3 可知,与经验参数选取适当的整体重置法一样,本文所述解耦方法亦可将耦合误差抑制在 0.08 以下,而且随着迭代步数增加基本趋于稳定,不会出现耦合系数不断增大的情况。这说明上述两种方法都具有良好的耦合误差抑制效果,像差校正过程中不会出现耦合累积的情况,而且在整个控制过程中,耦合分量都可以被抑制在极小的



范围内(耦合系数小于 0.08)。参数选取适当的整体重置法的耦合抑制效果略好于本文所述方法,但由于两者的数值都小于 0.08,如果以正交性而言,方向余弦对应夹角都大于  $85^\circ$ ,可以认为整个校正过程两个变形镜的面形近似正交(不相关)。

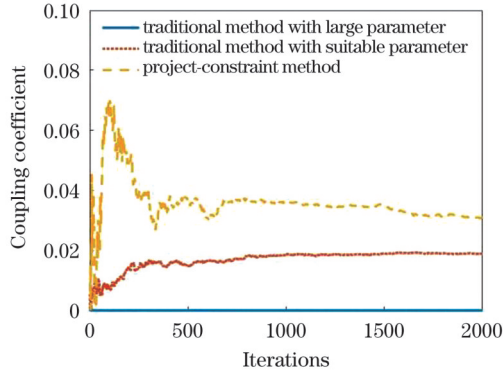


图 3 校正过程中的耦合系数  
Fig. 3 Coupling coefficient during correction

### 3) 解耦过程的稳定性

整体重置法需要通过变形镜影响函数的待抑制模式的系数矩阵构建出一个重置矩阵,每次 Tweeter 待加载电压实际加载之前都需要乘以一个重置矩阵,才能实现耦合误差抑制<sup>[12]</sup>。重置矩阵是单位矩阵(用以保证变形镜的面形不变)与 Tweeter 影响函数待抑制模式系数矩阵(用以保证消除耦合)组合而成的矩阵的逆矩阵,为了实现耦合消除,其条件数一般比 1 大 10 倍以上。其中,条件数直接对应运算过程中的误差传递上界,条件数越大,误差可能被放大的上限就越大,系统的稳定性就越差。虽然适当选取经验参数可以在校正效果与耦合抑制方面取得折中,但经验参数需要多次仿真实验才能获得,使用较为不便,而且此时解耦运算矩阵的条件数仍然远大于 1(约为 28)。在投影抑制过程中,矩阵运算包含两个方面,首先是由矩阵  $T_{vz}$  利用式(6)计算待抑制低阶 Zernike 模式系数,然后由矩阵  $T_{vz}$  利用式(7)计算得出模式系数对应的控制信号分量。因此,整个计算过程的误差传递上界由矩阵  $T_{vz}$  和  $T_{vz}$  中经过式(6)选择后的与解耦相关的部分的乘积决定。在仿真中,误差传递上界的数值仅为 1.093。投影抑制算法的计算过程不依赖于经验参数的选取,更为方便实用;同时,其条件数远小于经验参数适当时整体重置法的条件数,更不易受噪声影响,具有更好的稳定性。

### 4) 解耦过程中额外引入的计算量

两种解耦控制方法都需要增加额外的矩阵运算来实现耦合误差的消除。在整体重置法中,重置矩阵的大小为  $N \times N$ ,其中  $N$  为 Tweeter 驱动器的单元数。为了实现耦合抑制,整体重置法共需完成  $N^2$  次乘法运算。可见,耦合抑制运算量随变形镜驱动器单元数增加呈二次幂关系增长。在投影抑制法中,假定需抑制的低阶像差模式数为  $M$  ( $M$  一般远远小于  $N$ ,例如

Tweeter 只需要抑制倾斜、离焦和像散时,  $M=5$ ),则其运算量为计算低阶模式系数的  $N \times M$  次乘法运算,以及根据模式系数计算对应电压分量的  $M \times N$  次乘法运算,合计为  $2NM$  次乘法运算。可见,投影抑制法的运算量为变形镜驱动器单元数的一次幂函数。这说明,随着变形镜单元数增多,投影抑制法解耦运算计算量的增长速度显著小于整体重置法,如图 4 所示。

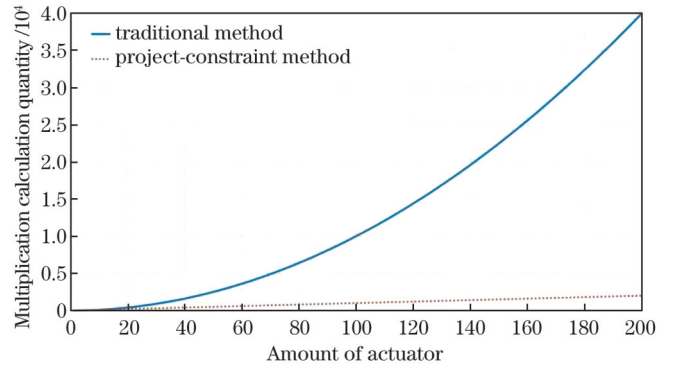


图 4 不同方法的解耦计算量  
Fig. 4 Calculation quantity for decoupling with different methods

## 3 实验验证

为了验证算法的有效性,构建了如图 5 所示的双变形镜原理性实验系统。一个 35 单元的 Bimorph 变形镜作为 Woofer,负责第 3~7 项 Zernike 模式补偿;另一个 35 单元的 Bimorph 变形镜作为 Tweeter,负责其余像差的补偿。需要说明的是,使用两个相同的 35 单元变形镜构建实验系统是因为本文仅进行算法的有效性验证,测试本文所述方法是否能在不同的变形镜上准确地完成像差的分级校正,在实际工程系统中应使用具有更多单元数的变形镜作为 Tweeter 才能充分发挥双变形镜系统对高阶像差的校正能力。在实验中使用双边 SPGD 算法更新变形镜的控制信号,系统优化过程的评价指标为归一化光强平方和。

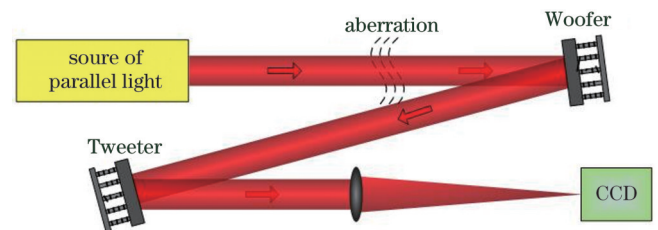


图 5 原理性实验系统结构图  
Fig. 5 Structure schematic of principle experiment system

分别使用本文所述解耦方法、经验参数选取适当的整体重置法、经验参数选取过大的整体重置法进行像差校正效果对比,结果如图 6 所示。使用本文所提方法可以取得与经验参数选取适当的整体重置法基本一致的像差校正效果,但其解耦运算的计算量和条件

数分别仅为经验参数选取适当的整体重置法的 20% 和 4%，而且解耦运算过程不依赖于经验参数的选择，使用更为便捷；相比经验参数选取过大的整体重置法，本文所提方法的校正效果更优。

与校正前相比，校正后的远场峰值光强显著增强，如图 7 所示，说明像差得到了有效校正。在实验过程中，记录 Woofer 与 Tweeter 的控制电压，使用干涉仪测定变形镜的影响函数，进而计算 Woofer 与 Tweeter 的像差校正量，并分解其模式系数。两个变形镜校正量的模式系数如图 8 所示，其中：Woofer 基本只产生第 3~7 项 Zernike 模式的补偿量；Tweeter 的像差补偿量中的第 3~7 项 Zernike 模式分量较少，其主要产生的是 Woofer 不负责校正的像差补偿量。可见，本文提出的解耦控制方法可以有效实现像差在两个变形镜之间的

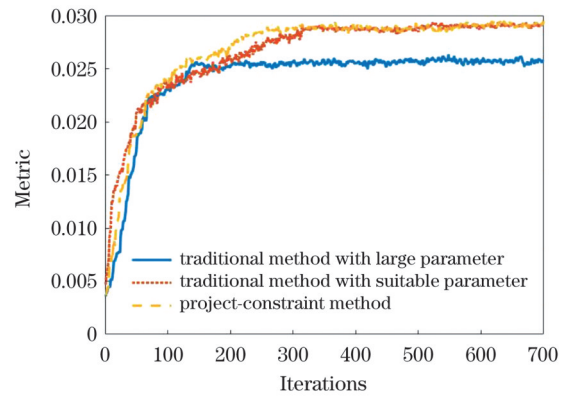


图 6 校正过程中的评价指标曲线  
Fig. 6 Metric curves during correction

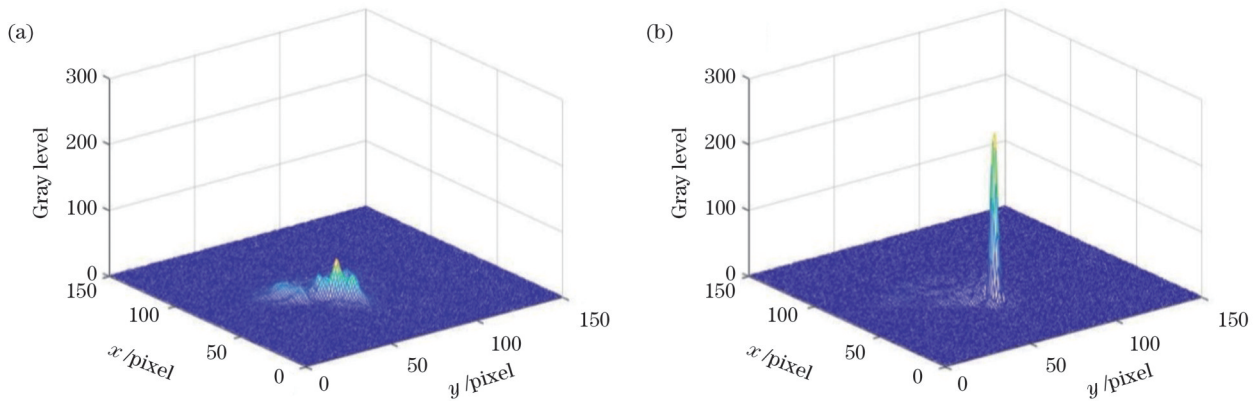


图 7 校正前后的远场图像。(a)校正前的远场图像；(b)校正后的远场图像

Fig. 7 Far-field images before and after correction. (a) Far-field image before correction; (b) far-field image after correction

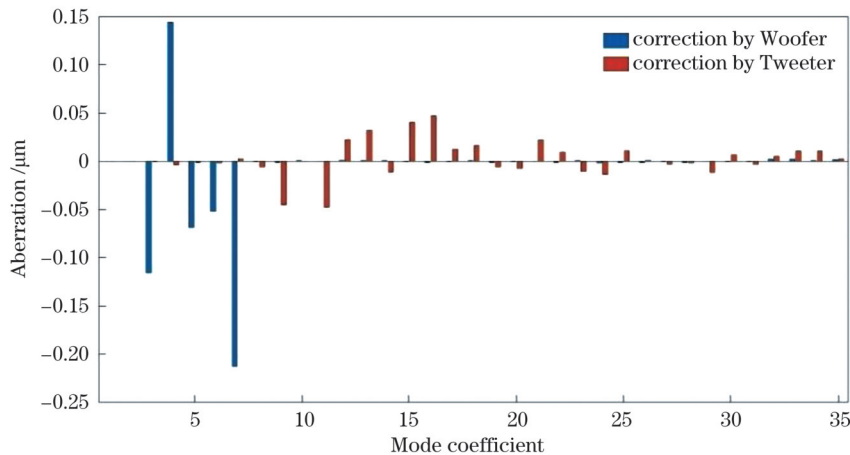


图 8 变形镜校正量的模式系数

Fig. 8 Mode coefficient of deformable mirror correction

## 4 结 论

针对无波前传感器自适应光学系统中的双变形镜解耦控制问题，本文提出了一种基于投影抑制的解耦方法，该方法能够使两个变形镜基于模式分解实现像差的高效协同分级校正。虽然传统的整体信号重置法亦可实现无波前传感器自适应光学系统的双变形镜解

耦控制，但其解耦过程依赖于经验参数的选择（当经验参数过小时，耦合误差难以得到有效抑制，而经验参数过大时，又会导致条件数过大），校正效果易出现陷入局部最优的情况。本文所提解耦方法的计算过程不依赖于经验参数的选择，计算过程更为简洁可靠。理论分析与仿真结果均表明所提方法能够准确完成像差校正，并可同时充分抑制两个变形镜像差校正量之间的

耦合分量,校正过程中耦合系数会逐渐收敛于小于 0.05 的数值。与经验参数选取适当的整体重置法相比,所提方法解耦计算过程中的条件数显著减少,受噪声的影响更小,同时计算量大幅减少(计算量由 Tweeter 驱动器个数的平方函数关系简化为线性关系),计算过程不受经验参数的影响,消除耦合分量的控制信号可由变形镜驱动器影响函数、Zernike 多项式与变形镜驱动器控制信号直接计算得出。所提方法的有效性得到了原理性实验的验证,具有较高的工程实践价值。

### 参 考 文 献

- [1] Dong L Z, Yang P, Xu B. Adaptive aberration correction based on ant colony algorithm for solid-state lasers: numerical simulations[J]. *Applied Physics B*, 2009, 96(2): 527-533.
- [2] 苏春轩,董理治,樊新龙,等.基于波前传感器标定优化的自适应光学校正方法[J].*中国激光*,2021,48(23):2305001.  
Su C X, Dong L Z, Fan X L, et al. Adaptive optics correction method based on calibration optimisation of wavefront sensor[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(23): 2305001.
- [3] Lei X, Xu B, Yang P, et al. Beam cleanup of a 532-nm pulsed solid-state laser using a bimorph mirror[J]. *Chinese Optics Letters*, 2012, 10(2): 021401.
- [4] Lei X, Wang S, Yan H, et al. Double-deformable-mirror adaptive optics system for laser beam cleanup using blind optimization[J]. *Optics Express*, 2012, 20(20): 22143-22157.
- [5] 马士青,杨平,赖柏衡,等.基于高效随机并行梯度下降算法的板条激光光束净化[J].*中国激光*,2020,47(8):0805001.  
Ma S Q, Yang P, Lai B H, et al. Slab laser beam cleanup based on efficient stochastic parallel gradient descent algorithm[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(8): 0805001.
- [6] Tyler G A. Adaptive optics compensation for propagation through deep turbulence: a study of some interesting approaches[J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(2): 021011.
- [7] Vorontsov M, Riker J, Carhart G, et al. Deep turbulence effects compensation experiments with a cascaded adaptive optics system using a 3.63 m telescope[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(1): A47-A57.
- [8] Zommer S, Ribak E N, Lipson S G, et al. Simulated annealing in ocular adaptive optics[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(7): 939-941.
- [9] Vorontsov M A, Carhart G W, Ricklin J C. Adaptive phase-distortion correction based on parallel gradient-descent optimization [J]. *Optics Letters*, 1997, 22(12): 907-909.
- [10] Hu S J, Xu B, Zhang X J, et al. Double-deformable-mirror adaptive optics system for phase compensation[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(12): 2638-2642.
- [11] 范占斌,戴一帆,宁禹,等.低阶像差校正的压电驱动变形镜测试与仿真优化[J].*国防科技大学学报*,2018,40(4):106-111.  
Fan Z B, Dai Y F, Ning Y, et al. Test and simulation optimizing of the unimorph deformable mirror for low-order aberration correction [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2018, 40(4): 106-111.
- [12] Liu W J, Dong L Z, Yang P, et al. A Zernike mode decomposition decoupling control algorithm for dual deformable mirrors adaptive optics system[J]. *Optics Express*, 2013, 21(20): 23885-23895.
- [13] Conan R, Bradley C, Hampton P, et al. Distributed modal command for a two-deformable-mirror adaptive optics system[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(20): 4329-4340.
- [14] Liu W J, Dong L Z, Yang P, et al. Zonal decoupling algorithm for dual deformable mirror adaptive optics system[J]. *Chinese Optics Letters*, 2016, 14(2): 020101.
- [15] 程涛,刘文劲,杨康健,等.基于拉普拉斯本征函数的 Woofer-Tweeter 自适应光学系统解耦控制算法[J].*中国激光*,2018,45(9):0905003.  
Cheng T, Liu W J, Yang K J, et al. Decoupling control algorithm based on Laplacian eigenfunction for Woofer-Tweeter adaptive optics system[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(9): 0905003.
- [16] Chen D C, Jones S M, Silva D A, et al. High-resolution adaptive optics scanning laser ophthalmoscope with dual deformable mirrors [J]. *Journal of Optical Society of American A*, 2007, 24(5): 1305-1312.
- [17] Cense B, Koperda E, Brown J M, et al. Volumetric retinal imaging with ultrahigh-resolution spectral-domain optical coherence tomography and adaptive optics using two broadband light sources [J]. *Optics Express*, 2009, 17(5): 4095-4111.
- [18] Vorontsov M A, Sivokon V P. Stochastic parallel-gradient-descent technique for high-resolution wave-front phase-distortion correction [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1998, 15(10): 2745-2758.
- [19] El-Agmy R, Bulte H, Greenaway A H, et al. Adaptive beam profile control using a simulated annealing algorithm[J]. *Optics Express*, 2005, 13(16): 6085-6091.
- [20] 许振兴,杨平,程涛,等.自适应光学系统的自学习控制模型及其验证[J].*中国激光*,2020,47(1):0105001.  
Xu Z X, Yang P, Cheng T, et al. Self-learning control model for adaptive optics systems and experimental verification[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(1): 0105001.

## Decoupling Control Algorithm Used for Wave Front Sensor-Free Adaptive Optics System with Dual Deformable Mirrors Based on Mode Project-Constraint

Liu Wenjin<sup>1\*</sup>, Xu Bing<sup>2,3</sup>, Sun Wenhan<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Electronics and Electrical Engineering, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 610308, Sichuan, China;*

<sup>2</sup>*Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, Sichuan, China;*

<sup>3</sup>*Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, Sichuan, China*

### Abstract

**Objective** Dual deformable mirrors are often used to create wave front-sensor-free adaptive optics systems that can be used to correct aberrations with broad strokes and high spatial frequencies. The Woofer, which has big amplitude and is used to correct low order



aberrations, and the Tweeter, which has a high spatial resolution and is used to correct high order aberrations, are two examples of dual deformable mirrors. However, without the decoupling process, it is difficult to avoid the coupling error, which would cause the deformable mirrors to generate an opposite surface shape and waste the ability of aberration correction in the dual deformable mirror adaptive optics system. To solve this problem and make the Woofer and Tweeter could work efficiently together; a decoupling method must be developed. Even the decoupling algorithms are the subject of considerable study, most of them focus on dual deformable mirror adaptive optics systems with wave front sensors. These techniques frequently employ the data from the wave front sensor to aid in decoupling. A few decoupling methods are used for the wave front sensor-free adaptive optics system, and their performances are usually not satisfactory for the engineering project. To improve the performance in the aberration correction, coupling error reduction, stability, and computation complexity for the wave front sensor-free adaptive optics system, a new decoupling technique must be developed. This might lead to further applications for the adaptive optics technology in things like large-scale telescopes, vision equipment, and laser beam cleanup.

**Method** To make the dual deformable mirrors in the system work together to correct the aberration, a straightforward but effective decoupling method based on the mode project-constraint is proposed. The Woofer is controlled by a low order Zernike mode coefficient to avoid correcting the high order modes, and the Tweeter is constrained by the project-constraint method to eliminate the low order modes in its corrections. Obtaining the related matrix of the mode coefficients to the Woofer control signal is essential to the decoupling control process. It can be obtained through the Woofer's influence functions and the low order Zernike modes which will be corrected by the Woofer. The project-constraint, which requires the following processes, can also limit the use of low order modes in the Tweeter. To start, a relationship matrix between the Zernike mode coefficients and the Tweeter's control signals needs to be produced. Then, the component of the signals in the Tweeter-induced coupling error can be solved by the relation matrix. Finally, by subtracting the component-induced coupling error from the initial Tweeter control signals, the signals free of coupling error can be obtained. These techniques result in the realization of the Woofer and Tweeter's decoupling.

**Results and Discussions** A simulation is used to validate the performance of the project-constraint decoupling method for the aberration correction, coupling error elimination, stability, and computation complexity. It can compensate the aberration better than the traditional method to decoupling method for the wave front sensor-free system (Fig. 2). Additionally, it can effectively eliminate the decoupling error between the Woofer and the Tweeter (Fig. 3), as the aberration is broken down into low order Zernike modes and high order modes before being corrected by the Woofer and Tweeter. During the decoupling operation, it is more stable than the conventional approach, and the advancements have improved its performance in the control process. Finally, the decoupling method suggests in the research has a lower computational complexity than the conventional method (Fig. 4). An experimental system was built to evaluate the effectiveness of the method. The experiment demonstrates that the decoupling algorithm can effectively compensate for phase distortions (Fig. 6 and Fig. 7) and significantly suppress the coupling error between the dual deformable mirrors and decompose the aberration accurately (Fig. 8).

**Conclusions** In this paper, a simple and effective method was proposed based on project-constraint to restrict the coupling error and eliminate the aberration in a wave front sensor less adaptive optics system with a dual deformable mirror. This method can outperform the conventional method in terms of aberration correction, coupling error elimination, stability, and processing complexity. It can be used to make the Woofer and Tweeter cooperate efficiently to correct the aberration by Zernike mode decomposition. Then the low order Zernike modes of the aberration can be compensated by the Woofer, and the other Zernike modes of the aberration can be corrected by the Tweeter.

**Key words** adaptive optics; dual deformable mirror; decoupling control; project-constraint