

一种自适应光学闭环系统预测控制算法的仿真研究

颜召军^{1,2,3} 李新阳^{1,2} 饶长辉^{1,2}

¹ 中国科学院光电技术研究所自适应光学研究室, 四川 成都 610209
² 中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209
³ 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 介绍了校正大气湍流畸变波前像差的自适应光学系统中, 基于预测控制技术对变形镜控制电压进行预测以减少自适应光学系统中时间延迟误差的方法。对受横向风影响的大气湍流畸变波前斜率数据, 利用数值仿真方法, 研究了基于递推最小二乘(RLS)算法的线性预测控制算法对自适应光学系统变形镜控制电压进行超前预测的方法, 并与采用比例积分(PI)控制算法时的最好校正效果进行了比较。对比结果表明, 采用预测控制的方法比经典 PI 控制的方法能更有效地降低系统由伺服延迟引起的误差。

关键词 自适应光学; 预测控制; 递推最小二乘算法; 比例积分控制算法; 变形镜控制电压

中图分类号 O437; TP273.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0101003

Numerical Simulation of a Prediction Control Algorithm for Close-Loop Adaptive Optical System

Yan Zhaojun^{1,2,3} Li Xinyang^{1,2} Rao Changhui^{1,2}

¹ Key Laboratory on Adaptive Optics, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China
² Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China
³ Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract To reduce the servo lag error in adaptive optics system which corrects the atmosphere turbulence distortion, a prediction control algorithm to predict the control voltage of deformable mirror is proposed. The prediction control method with recursive least-square (RLS) algorithm is used to predict the voltage of deformable mirror in advance. Numerical simulation, based on the atmospheric turbulence distorted wave-front slope data changing with different transversal wind is studied. The residual error of the adaptive optics system is calculated and compared with the prediction control algorithm and proportional integral (PI) control algorithm. The results show that the residual error caused by servo lag in the system is reduced more effectively by using the prediction control algorithm than by using the PI control algorithm.

Key words adaptive optics; prediction control algorithm; recursive least-square algorithm; proportional integral control algorithm; voltage of deformable mirror

OCIS codes 010.1080; 010.1330; 120.4820; 070.2025

1 引言

自适应光学(AO)系统利用变形镜等波前校正器来实时校正大气湍流引起的动态像差^[1], 它是一类时间延迟的伺服系统, 通常延迟时间为 2~3 个采样周期^[1~3]。系统延迟主要是由波前探测器(WFS)

数据采集的时间延迟, 读出延迟, 波前复原计算延迟, 控制运算延迟, 伺服延迟等原因引起的。目前 AO 系统中采用的经典控制, 如比例微积分(PID)控制, 系统的有效带宽只有 CCD 帧频的 1/30~1/20, 闭环带宽只有 CCD 帧频的 1/10 左右^[1]。虽然利用

收稿日期: 2010-05-11; 收到修改稿日期: 2010-07-19

基金项目: 国家自然科学基金(60978050)和四川省青年基金(09ZQ026-014)资助课题。

作者简介: 颜召军(1983—), 男, 博士研究生, 主要从事自适应光学技术方面的研究。E-mail: yzhaojun55@126.com

导师简介: 饶长辉(1971—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事自适应光学技术方面的研究。E-mail: chrhao@ioe.ac.cn

相位延迟补偿技术和自适应控制技术在一定程度上改善了 AO 系统的控制性能,但是仍然没有从根本上解决时间延迟问题。

预测技术可以减小系统伺服延迟的影响,从而改善系统的控制效果。应用预测技术的前提是大气湍流引起的像差必须是可预测的。Aitken 等^[3]指出大气湍流像差的统计特性符合布朗运动,其 Hust 参数为 5/6,且大气湍流像差通过望远镜或哈特曼传感器是一种空间线性滤波。根据该理论可知,大气湍流像差是可预测的。国际上很多学者都对自适应光学预测控制技术进行了研究:Jorgenson 等^[4~7]采用神经网络预测技术预测波前斜率;Michael Lloyd-Hart 等^[8,9]主要关注开环大气湍流像差的区域斜率预测算法研究等。张秀娟^[10]对大气湍流畸变引起的变形镜控制电压的预测方法进行了研究,但这种研究是针对开环大气进行的。本文利用基于递推最小二乘算法的预测控制技术对自适应光学闭环系统的变形镜控制电压进行超前预

测,以提高闭环控制的校正效果。

2 自适应光学系统预测控制基本原理

如果可以直接获得大气湍流像差的数据,那么预测控制是比较容易实现的。通过一个前馈型自适应光学控制结构可以比较容易理解预测控制的基本原理。一个典型的前馈型的自适应光学预测控制系统结构如图 1 所示。波前探测器探测得到的波前通过波前复原计算(WRC)得到复原电压,复原电压通过控制器(CC)和预测器(P)得到控制电压,控制电压经过数模转换(D/A)得到驱动变形镜的控制电压。不进行预测时,复原后的变形镜控制电压直接进行校正。由于从探测到校正的整个控制过程中会产生约 2~3 个采样周期的时间延迟,直接控制会产生较大的时间延迟误差。采用预测技术可以减小时间延迟的影响。本文的研究重点是变形镜控制电压预测器(P)的实现。

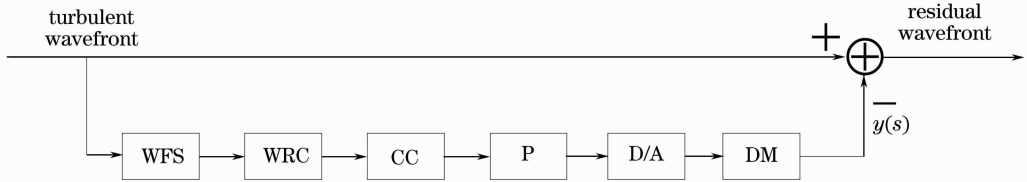


图 1 前馈型自适应光学预测控制系统结构图

Fig. 1 Block diagram of forward feed adaptive optical prediction control system

以测量波前斜率为基础的波前传感器只能直接测量出各子孔径的波前斜率数据,为了将波前传感器所测量的斜率转化为复原电压,需要采用一定的波前复原算法,这里采用的是直接斜率波前复原算法^[11~13]:

$$\mathbf{V} = \mathbf{R}^+ \mathbf{g}, \quad (1)$$

式中 \mathbf{V} 是复原电压, \mathbf{R} 为变形镜到哈特曼传感器的斜率响应矩阵,由实验测得, \mathbf{R}^+ 是 \mathbf{R} 的伪逆矩阵,满足 $\mathbf{R}^+ \mathbf{R} = \mathbf{I}$, \mathbf{g} 是需要校正的波前像差的斜率测量值。

根据 Taylor 冻结湍流假设,在某个非常短的时间内大气湍流的相对空间结构保持不变,光波路径上湍流介质的变化是由横向风的吹动所致。因此,由某一子孔径以及周围子孔径的历史波前来预测该子孔径将来时刻的波前是非常有意义的。由于这种二维预测方式引入了周围子孔径的信息,与单维预测方式,如模式预测相比,包含特定风向的信息更多,理论上,这种二维的预测方式比单维预测方式应该更有优势^[9]。

由直接斜率波前复原算法可知,复原电压和测

量波前之间存在线性变换关系,因此可以直接对复原电压进行预测。通常波前斜率数据量是变形镜驱动器电压数据量的两倍,对斜率数据进行预测计算需要的数据量非常大,因而计算花费的时间比较长,受传感器噪声等的扰动也非常大。通过波前复原算

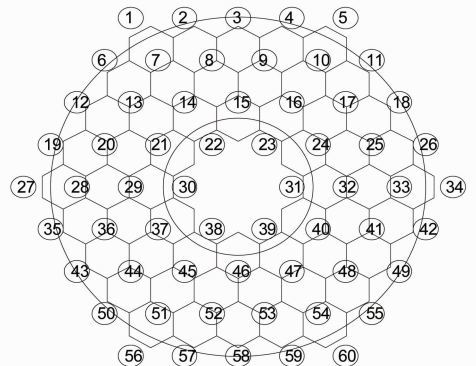


图 2 61 单元变形镜驱动器和哈特曼子孔径排布

Fig. 2 Configuration of actuators of the 61-element deformable mirror and sub-apertures of Shack Hartmann sensor

法后,变形镜的驱动电压变化比较平缓,受传感器噪声的影响也将减少,有利于得到比较稳定的预测控制效果。本文采用的哈特曼传感器为54个子孔径,驱动器为61单元,呈六边形排布,如图2所示,中心的1个驱动器不参与控制,所以有效驱动器为60个。

3 RLS 电压预测控制算法

通常自适应光学系统存在2~3个采样周期的时间延时。这种情况下,从波前传感器斜率复原计算出的变形镜驱动器电压要延迟2~3个采样周期后才能施加到变形镜上产生校正作用,校正电压与扰动电压间的时间延迟造成较大的控制残差。在预测控制算法中,利用变形镜各个驱动器的历史电压预测驱动器在将来2~3个时刻的电压,如图3所示。它根据 $t=1,2,3$ 三个时刻的驱动器电压值,通过预测控制算法,计算出超前2帧 $t=5$ 时刻的电

压。由于预测的作用,校正电压与扰动电压更加符合,得到较小的校正残差。预测过程减小了时间延迟的影响,可以提高自适应光学系统的控制效果。

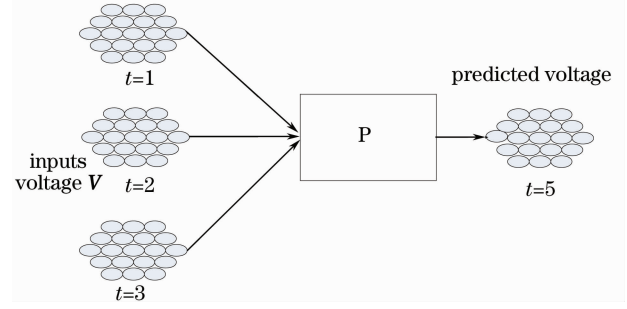


图3 利用历史电压预测未来电压的示意图

Fig. 3 A drawing showing how all the voltages for the past three frames are used to predict the future voltage

假设数据总帧数是 N ,当前时刻 k ,根据图3的预测基本原理,那么可以构造出两个矩阵 \mathbf{V}_f (未来电压)和 \mathbf{V}_h (历史电压):

$$\mathbf{V}_f = \{\mathbf{V}(k+2), \mathbf{V}(k+1), \dots, \mathbf{V}(k-i), \dots, \mathbf{V}[k-(N-3)]\}, \quad (2)$$

$$\mathbf{V}_h = \begin{bmatrix} \mathbf{V}(k-q+1) & \mathbf{V}(k-q) & \cdots & \mathbf{V}[k-(q+N-2)] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{V}(k-1) & \mathbf{V}(k-2) & \cdots & \mathbf{V}(k-N) \\ \mathbf{V}(k) & \mathbf{V}(k-1) & \cdots & \mathbf{V}[k-(N-1)] \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中 q 为回溯帧数。根据预测原理,基于已经记录的历史电压向量 \mathbf{V}_h ,利用 q 帧历史数据进行回溯计算,预测超前两帧时刻的电压。考虑一种线性预测,即构建 \mathbf{V}_h 和 \mathbf{V}_f 满足线性关系:

$$\mathbf{V}_f = [\mathbf{W}_{q-1}, \mathbf{W}_{q-2}, \dots, \mathbf{W}_0] \cdot \mathbf{V}_h. \quad (4)$$

文中取 $q=3$, $\mathbf{W} = [\mathbf{W}_2, \mathbf{W}_1, \mathbf{W}_0]$,其中 \mathbf{W}_i ($i=2,1,0$)的维数为 60×60 ,分别对应 $k-i$ ($i=2,1,0$)时刻的回溯电压与预测电压之间的权重系数矩阵。当 $\mathbf{W}_2 = \mathbf{W}_1 = 0, \mathbf{W}_0 = \mathbf{I}$ 时,就是无预测时的效果。

构建 \mathbf{V}_h 和 \mathbf{V}_f 的线性关系后,所有的问题就转化为寻找一种合适的算法来确定线性权重矩阵 \mathbf{W} 了。在知道全部历史数据 \mathbf{V}_h 的条件下,可以用最小方差法求解:

$$\mathbf{W} = \mathbf{V}_f \cdot \mathbf{V}_h^+ = \mathbf{V}_f \mathbf{V}_h^T (\mathbf{V}_h \mathbf{V}_h^T)^{-1}. \quad (5)$$

(5)式就是自适应光学系统电压预测的批处理算法,但是批处理算法的计算量非常大,而且由于大气湍流特性和横向风速可能在不断变化,预测权重

矩阵 \mathbf{W} 也可能发生变化,因此批处理算法对实时系统是不合适的。

对于本文的线性预测问题,在知道历史数据 $\mathbf{V}(k-i)$ ($i=0,1,2,3,4$)的条件下,根据图3的预测基本原理,可以构建最小二乘参数估计(6)式来实时估计权重矩阵 $\mathbf{W}(k)$:

$$\mathbf{V}_f(k-2) = \mathbf{W}(k) \cdot \mathbf{V}_h(k-2), \quad (6)$$

$$\mathbf{V}_h(k-2) = \begin{bmatrix} \mathbf{V}(k-4) \\ \mathbf{V}(k-3) \\ \mathbf{V}(k-2) \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$\mathbf{V}_f(k-2) = \mathbf{V}(k). \quad (8)$$

(6)式的最小二乘参数估计属于多输入-多输出系统的参数估计问题,求解这类问题的递推最小二乘算法的具体推导过程可参考文献[14]。根据文献[14],得到采用递推最小二乘算法实时迭代求解(6)式的迭代过程如下:

$$\mathbf{W}(k) = \mathbf{W}(k-1) + \frac{\mathbf{P}^T(k-1)\mathbf{V}_h^T(k-2)[\mathbf{V}_f(k-2) - \mathbf{V}_h(k-2)\mathbf{W}(k-1)]}{\lambda + \mathbf{V}_h^T(k-2)\mathbf{P}(k-1)\mathbf{V}_h(k-2)}, \quad (9)$$

$$\mathbf{P}(k) = \frac{1}{\lambda} \left[\mathbf{P}(k-1) - \frac{\mathbf{P}(k-1)\mathbf{V}_h(k-2)\mathbf{V}_h^T(k-2)\mathbf{P}(k-1)}{\lambda + \mathbf{V}_h^T(k-2)\mathbf{P}(k-1)\mathbf{V}_h(k-2)} \right], \quad (10)$$

式中一般取 $\lambda=0.99$, $\mathbf{P}(0) = \gamma\mathbf{I}$, 根据实验检验 γ 取 $10^2 \sim 10^5$ 量级, \mathbf{I} 为单位矩阵, 初值取 $\mathbf{W}(0)=0$ 。

实时迭代求解出权重矩阵 $\mathbf{W}(k)$ 后, 更新历史电压数据,

$$\mathbf{V}_h(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{V}(k-2) \\ \mathbf{V}(k-1) \\ \mathbf{V}(k) \end{bmatrix}, \quad (11)$$

然后根据预测控制原理可得到当前时刻的预测电压 $\mathbf{V}_f(k)$

$$\mathbf{V}_f(k) = \mathbf{W}(k)\mathbf{V}_h(k). \quad (12)$$

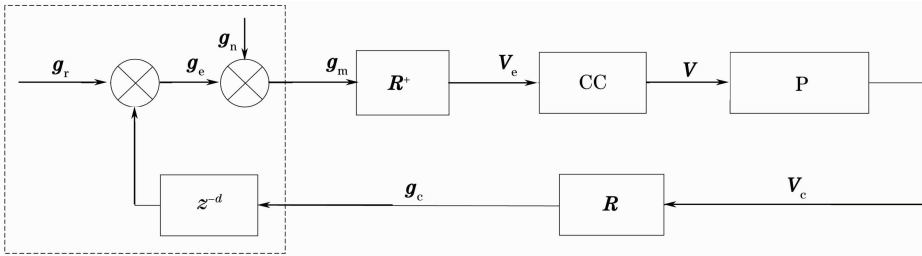


图 4 负反馈型自适应光学预测控制系统仿真模型

Fig. 4 Simulation model of negative feedback adaptive optical prediction control system

本文的仿真基于大气湍流波前斜率数据。 \mathbf{g}_r 是大气湍流扰动波前斜率; \mathbf{g}_c 是补偿波前斜率; \mathbf{g}_e 是波前斜率残差; \mathbf{g}_n 是探测噪声; \mathbf{g}_m 是带有探测噪声的波前斜率残差; \mathbf{V}_c 是经过波前复原计算的复原电压; \mathbf{V} 是复原电压通过比例积分 (PI) 控制后的变形镜控制电压; \mathbf{V}_c 是通过预测器 (P) 后的变形镜预测控制电压; d 是系统时间延迟。 \mathbf{R} 为变形镜到哈特曼传感器的斜率响应矩阵, \mathbf{R}^+ 是其伪逆矩阵。

在实际的自适应光学系统闭环实时运行时, 信号 \mathbf{g}_r 是不可知的。为了使本文的仿真更接近实际的 AO 系统, 本文的仿真模型图中左边虚线矩形框中的部分是未知的。已知的信号是当前时刻以及历史的 $\mathbf{g}_m, \mathbf{V}_c, \mathbf{V}$ 和历史的 $\mathbf{V}_c, \mathbf{g}_c$ 。

4.2 控制效果评价指标

由于本文是基于其它大气湍流仿真程序产生的哈特曼传感器子孔径斜率数据进行的, 并没有波前像差的数据, 因而在控制算法的仿真和控制效果比较时, 无法对波前像差 RMS 值和远场光斑斯特列比等进行比较。在文献 [10~12] 中, 利用了一种用闭环残差对应的传感器斜率数据或变形镜电压数据的统计平均进行对比的方法, 本文也采用这种方法。

4 自适应光学负反馈闭环系统预测控制算法

4.1 仿真模型

一般的自适应光学系统是在负反馈闭环控制状态下工作的。这时无法直接得到大气湍流扰动像差信息, 必须经过波前复原和控制算法后才能获得相应的控制电压信号。本文采用的负反馈型预测控制系统的模型如图 4 所示。

不同控制算法的闭环控制效果用电压系数 η_v 和斜率系数来评价 η_g ,

$$\eta_v = \frac{\langle \sum_{i=1}^{60} \mathbf{V}_{ie}^2 \rangle}{\langle \sum_{j=1}^{60} \mathbf{V}_{je0}^2 \rangle}, \quad (13)$$

$$\eta_g = \frac{\langle \sum_{i=1}^{54} (\mathbf{g}_{imx}^2 + \mathbf{g}_{imy}^2) \rangle}{\langle \sum_{j=1}^{54} (\mathbf{g}_{jrx}^2 + \mathbf{g}_{jry}^2) \rangle}, \quad (14)$$

在 \mathbf{V}_{ie} 是闭环时第 i 个变形镜的控制电压, \mathbf{V}_{je0} 是开环时第 j 个变形镜的控制电压。 $\mathbf{g}_{imx}, \mathbf{g}_{imy}$ 分别是闭环时第 i 个子孔径的斜率在 X 和 Y 方向上的残差, $\mathbf{g}_{jrx}, \mathbf{g}_{jry}$ 分别是开环时第 j 个子孔径 X 和 Y 方向上的波前斜率。 $\langle \rangle$ 表示系统平均。根据定义, η_v, η_g 在 0~1 之间, η_v, η_g 应越小越好。

4.3 仿真条件

如图 2 所示的 61 单元自适应光学系统布局, 从哈特曼波前传感器测量到变形镜校正的时间延迟为 2 frame。波长 $0.6328 \mu\text{m}$, 湍流强度的主要参数之一大气折射率结构常数分别为: $C_n^2 = 2 \times 10^{-16}, 5 \times$

$10^{-16}, 8 \times 10^{-16}, 1 \times 10^{-15}$; 光束口径 0.6 m, 每 1000 m 均匀设置了 3 个相屏, 总的传输距离 3000 m。采样频率 500 Hz, 在 0.6 m 口径内的计算网格 128×128 , 每个子孔径的网格密度大约为 14×13 。文中的动态大气湍流像差的数据是根据冻结湍流理论, 用一种经典的拖动像屏法产生的。即首先生成一幅很大的符合大气湍流统计规律的相屏, 选择一个较小的有效口径区域, 然后每次迭代时拖动大相屏一个固定的步长, 生成一序列符合动态大气湍流统计特性的像差数据。 X 方向的横向风在 $1 \sim 9$ grid/frame 之间变化, Y 方向的横向风在 $1 \sim 6$ grid/frame 之间变化。仿真数据总长为 $N=3000$ frame。

4.4 仿真流程

- 1) 初始化 $q = 3, P(0) = \gamma I, W(0) = 0$ 以及 PI 控制器的参数等, 导入扰动输入信号 g_r ;
- 2) 根据闭环过程计算波前斜率残差 $g_m(k) =$

$g_r(k) - g_c(k-2) + g_n$, 计算复原电压 $V_c(k) = R^+ \cdot g_m(k)$, PI 控制计算 $V(k) = a_0 \cdot V(k-1) + b_0 \cdot V_c(k)$;

- 3) 根据(7) ~ (12) 式计算得到 $V_c(k)$ 等, 然后计算 $g_c(k) = R \cdot V_c(k)$;
- 4) $k = k + 1$, 若 $k < N$ 转入步骤 2), 否则结束。

5 自适应光学系统预测控制算法仿真结果分析

5.1 预测控制算法的收敛过程分析

由于 RLS 算法是一种迭代算法, 预测值能否收敛到相应的真实值是需要考虑的问题, 因此需验证算法的收敛性。图 5 和图 6 是在 $C_n^2 = 1 \times 10^{-15}$, X 方向风速为 5 grid/frame, PI 控制系数 $a_0 = 0.99, b_0 = 0.2$, 信噪比 $R_{SN} = 1 \times 10^5$ 的条件下进行的仿真。

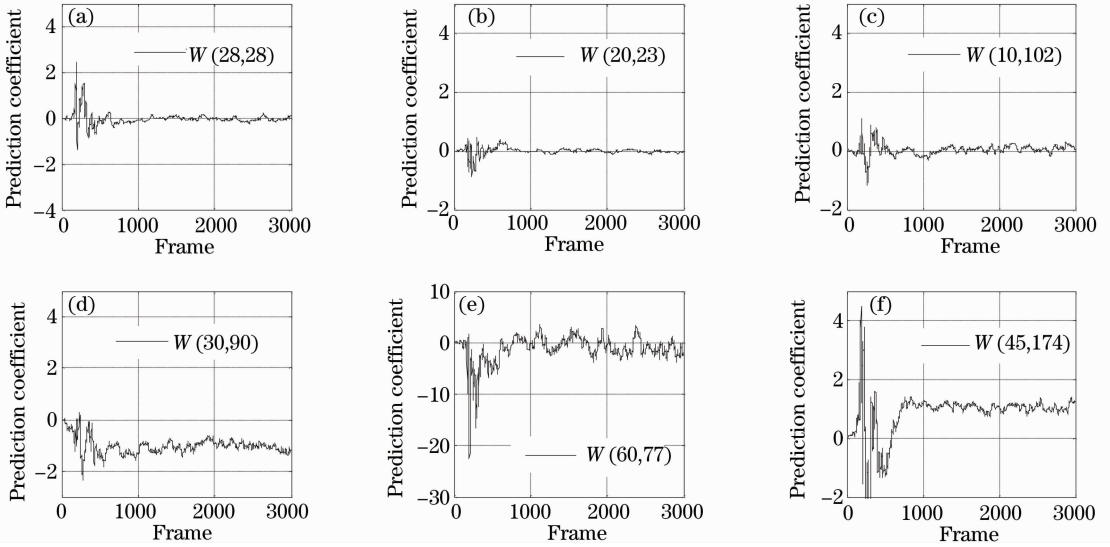


图 5 系数值随帧数变化情况

Fig. 5 Coefficients versus frame

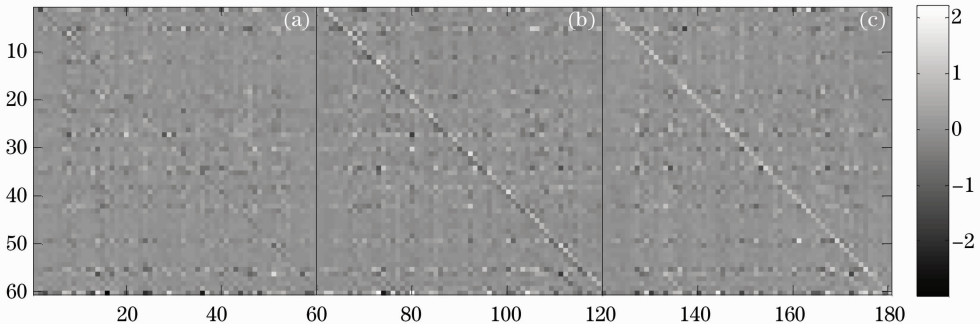


图 6 W 收敛值灰度图。(a) W_2 , (b) W_1 , (c) W_0

Fig. 6 Grey-scale map of convergence value of W . (a) W_2 , (b) W_1 , (c) W_0

图 5 中(a)~(f)分别是从 \mathbf{W} 矩阵中随机选取的 6 个元素(即预测系数)值在进行迭代时随帧数变化的情况,横坐标是帧数变化,纵坐标是预测系数值。从图 5 中可以看出,当帧数达到 1000 frame 时,这些系数已基本收敛了。在其他湍流强度、风速和不同信噪比的条件下对预测控制算法进行了仿真,仿真结果表明该算法都能很好收敛。

图 6 是权重矩阵 \mathbf{W} 的收敛值灰度图,分为三块,分别表示 $\mathbf{W}_2, \mathbf{W}_1, \mathbf{W}_0$ 的收敛值灰度图。结合图 5 和图 6,可以看到(a),(b),(c),(e)中的系数 $W(28,28), W(20,23), W(40,102), W(60,77)$ 的收敛值约等于 0;图 5(d),(f)中的系数 $W(30,90), W(54,174)$ 的收敛值分别约等于 -1 和 1。图 5(a)~(f)只是给出的一些例子,通过观察大量的预测权重矩阵 \mathbf{W} 的系数的收敛过程及收敛值可以得出如下的结论:处在 \mathbf{W}_2 对角线上的系数的收敛值在 -0.4~1.6 之间,其均值约为 0.8;处在 \mathbf{W}_1 对角线上的系数收敛值在 -1.5~0.5 之间,其均值约为 -0.5;处在 \mathbf{W}_0 对角线上的系数的收敛值在 0.3~1.5 之间,其均值约为 0.16;而那些不处在 $\mathbf{W}_2, \mathbf{W}_1, \mathbf{W}_0$ 对角线上的绝大部分系数的收敛值约等于 0。出现上面诸多现象的原因是:变形镜在 k 时刻的预测电压,和 $\mathbf{V}(k)$ 的相关性最高,和 $\mathbf{V}(k-1)$ 的相关性次之,和 $\mathbf{V}(k-2)$ 的相关性最低,且某一驱动器在某时刻的预测电压和自

身驱动器的历史电压相关性最高,和离该驱动器最近的驱动器的历史电压的相关性次之。即变形镜在某一时刻的预测控制电压主要受距离时间较近的自身历史电压的影响。

5.2 系数 b_0 对校正效果的影响

表 1 和表 2 是 $C_n^2 = 8 \times 10^{-16}, R_{SN} = 1 \times 10^5$, 风速分别为 1~9 grid/frame 条件下预测控制算法的仿真结果(文中只列出了 $b_0 = 0, 0.1, 0.2, 0.3$ 时的结果,当 $b_0 \geq 0.4$ 时预测控制算法已经失效了,RLS 迭代已经不收敛了)。从表 2 中可以看出,在仿真湍流强度、风速等一定的条件下,存在最优的系数 b_0 ,使得电压系数最小。当风速为 8 grid/frame 时,最优的系数 $b_0 = 0.3$,而在其他风速条件下,最优的系数 $b_0 = 0.2$ 。作者也在其他湍流强度和风速条件下进行了预测控制算法的仿真,得出如下的结论:采用预测控制算法时,系统的校正效果和系数 b_0 有关,存在最优的系数 b_0 ;在不同的湍流强度、风速等仿真条件下,采用预测控制算法时的最优系数 b_0 在 0.2~0.3 之间;在绝大部分情况下,采用预测控制算法时的最优系数 $b_0 = 0.2$ (本文的系数 b_0 精度取为 0.1),在极少数情况下,预测采用控制算法的最优系数 $b_0 = 0.3$ 。

表 1 采用预测控制算法时的斜率系数 η_k 值随系数 b_0 变化情况

Table 1 η_k with different coefficients b_0 using prediction control algorithm

b_0	Wind velocity /(grid/frame)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0.8997	1.0274	1.0505	0.9788	0.9832	1.0154	0.9975	1.0245	0.9775
0.1	0.5782	0.5492	0.6435	0.6819	0.6762	0.7299	0.7039	0.8182	0.8103
0.2	0.4934	0.4549	0.5318	0.5913	0.5960	0.6422	0.6164	0.7243	0.7347
0.3	0.5680	0.4795	0.5465	0.6335	0.6244	0.6645	0.6177	0.7144	0.7373

表 2 采用预测控制算法时的电压系数 η_v 值随系数 b_0 变化情况

Table 2 η_v with different coefficients b_0 using prediction control algorithm

b_0	Wind velocity /(grid/frame)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0.8596	1.0268	1.0459	0.9625	0.9732	1.0251	0.9969	1.0365	0.9832
0.1	0.3799	0.3356	0.4716	0.5371	0.5327	0.6148	0.6032	0.7361	0.7178
0.2	0.2659	0.2132	0.3269	0.4138	0.4242	0.4909	0.4791	0.6035	0.6089
0.3	0.3985	0.2691	0.3784	0.5042	0.4747	0.5518	0.4954	0.5916	0.6244

从表 1 和 2 中可以看到斜率系数值和电压系数值的变化规律是一致的。在某种风速下,选择斜率系数作为评价指标时的最优 b_0 值也恰好是选择电压系数作为评价指标时的最优 b_0 值。在其他的湍

流强度和风速条件下进行了仿真,仿真结果表明,在仿真条件相同的情况下,电压系数值和斜率系数值的变化规律是一致的。因此在下面的讨论中只选择了电压系数作为评价指标。

表 3 给出了采用经典 PI 控制算法时的仿真结果(仿真条件和表 2 相同)。从表 3 中可看出,采用经典 PI 控制算法时,对于不同的风速,存在最优的系数 b_0 ,使得电压系数最小。风速小时,最优 b_0 值

较大,风速为 1 grid/frame 时,最优 $b_0=0.7$;风速较大时,最优 b_0 值较小,如风速为 8 grid/frame 时,最优 $b_0=0.1$ 。

表 3 采用 PI 控制算法时的电压系数 η_V 值随系数 b_0 变化情况
Table 3 η_V with different coefficient b_0 using PI control algorithm

b_0	Wind velocity /(grid/frame)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	1.0028	0.9901	0.9908	1.0033	0.9846	0.9909	0.9929	0.9834	0.9949
0.1	0.5488	0.4326	0.5787	0.7116	0.7044	0.7731	0.8048	0.9352	0.9550
0.2	0.3824	0.2910	0.4574	0.6128	0.6787	0.7451	0.7693	0.9401	0.9785
0.3	0.2946	0.2207	0.3982	0.5673	0.6750	0.7578	0.7590	0.9378	1.0079
0.4	0.2388	0.1760	0.3704	0.5535	0.6950	0.8056	0.7836	0.9559	1.0656
0.5	0.1998	0.1449	0.3627	0.5655	0.7471	0.8953	0.8491	1.0225	1.1729
0.6	0.1729	0.1237	0.3702	0.6110	0.8460	1.0432	0.9744	1.1665	1.3615
0.7	0.1576	0.1116	0.3945	0.7167	1.0246	1.2944	1.2153	1.4436	1.6957
0.8	0.1596	0.1116	0.4517	0.9604	1.3908	1.8171	1.7379	2.0381	2.3994
0.9	0.2090	0.1469	0.6243	1.7405	2.5708	3.6558	3.2691	3.6906	5.0790

目前自适应光学系统的控制算法是线性时不变的,是基于已知或假定的大气湍流统计特性的,没有自适应性。而大气湍流特性随时都在变化,控制器参数需要经常调整;经典控制算法的控制器调整工作非常复杂,需要丰富的实际工作经验和较长的时间。这些都是经典控制算法的缺点。而从表 2 中可看出,采用预测控制技术后,最优系数 b_0 (亦即控制器参数)的变化范围很小,一般取 0.2 基本可使校正效果达到最优。当湍流强度和风速变化时,由于预测控制算法的最优控制器参数 b_0 的变化范围很小,无需调整控制器参数即可取得很好的校正效果。因此,预测控制技术可以很好的克服经典 PI 控制没有自适应性的缺点。

制器参数 b_0 调到最优,预测控制算法的控制器参数 b_0 也调到最优条件下进行的。

5.3 噪声对预测控制算法校正效果的影响

为了验证预测控制算法在系统有噪声时是否还有效,在 $C_n^2=8 \times 10^{-16}$ 条件下,仿真过程中加入不同信噪比的噪声,表 4 是仿真结果。可以看出,风速一定时,随着信噪比 R_{SN} 的增大,预测控制算法的校正效果逐渐变好。即使在噪声很强($R_{SN}=2$),风速小于 8 grid/frame 时,预测控制依然有一定的校正效果。在风速一定时,信噪比 $R_{SN}=10$ 时的电压系数和 $R_{SN}=1 \times 10^5$ 时的电压系数很接近,说明预测控制算法受噪声干扰的影响较小。

以下的所有比较,都是在经典 PI 控制算法的控

表 4 采用预测控制算法时的电压系数 η_V 值随信噪比变化情况
Table 4 η_V with different SNR using prediction control algorithm

R_{SN}	Wind velocity /(grid/frame)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
2	0.5872	0.4792	0.6087	0.6989	0.7119	0.8328	0.7501	0.9223	0.9420
5	0.3208	0.2631	0.3767	0.4712	0.4754	0.5559	0.5338	0.6721	0.6692
10	0.2796	0.2263	0.3371	0.4237	0.4400	0.5059	0.4927	0.6254	0.6259
20	0.2687	0.2137	0.3284	0.4140	0.4282	0.4961	0.4849	0.6082	0.6071
100	0.2651	0.2134	0.3276	0.4143	0.4268	0.4910	0.4810	0.6038	0.6084
100000	0.2655	0.2142	0.3262	0.4147	0.4276	0.4908	0.4782	0.6008	0.6068

5.4 预测控制算法和经典 PI 控制算法的仿真结果对比分析

图 7 是在 $C_n^2=2 \times 10^{-16}, 5 \times 10^{-16}, 8 \times 10^{-16}, 1 \times 10^{-15}$, 风速分别为 1~9 grid/frame, $R_{SN}=1 \times$

10^5 , 采用 PI 控制算法和预测控制算法时的电压系数值变化情况。可以看到,随着风速的加大,两种控制算法的校正效果都逐渐变差。当风速较小时,预测控制算法的校正效果差于 PI 控制算法的校正效

果。但是随着风速的加大,预测控制算法的校正效果要比 PI 控制算法的校正效果好。当风速为 3 grid/frame 时,两种控制算法的校正效果差不多。当风速大于 3 grid/frame 时,采用预测控制算法的校正效果要比采用 PI 控制算法的校正效果提高 35% 左右。即使在风速达到 8 grid/frame 和 9 grid/frame 时,预测控制算法仍然有不错的校正效

果。出现这种现象的原因是:在风速很小的情况下,无需预测就可以取得较好效果,预测控制算法的优势无法发挥。随着风速逐渐变大,预测控制算法逐渐发挥作用,校正效果比无预测时的校正效果好。但是因受限到 PI 控制环节自身校正效果的限制,在湍流强度等因素不变的情况下,随着风速的加大,预测控制算法的校正效果是逐渐变差的。

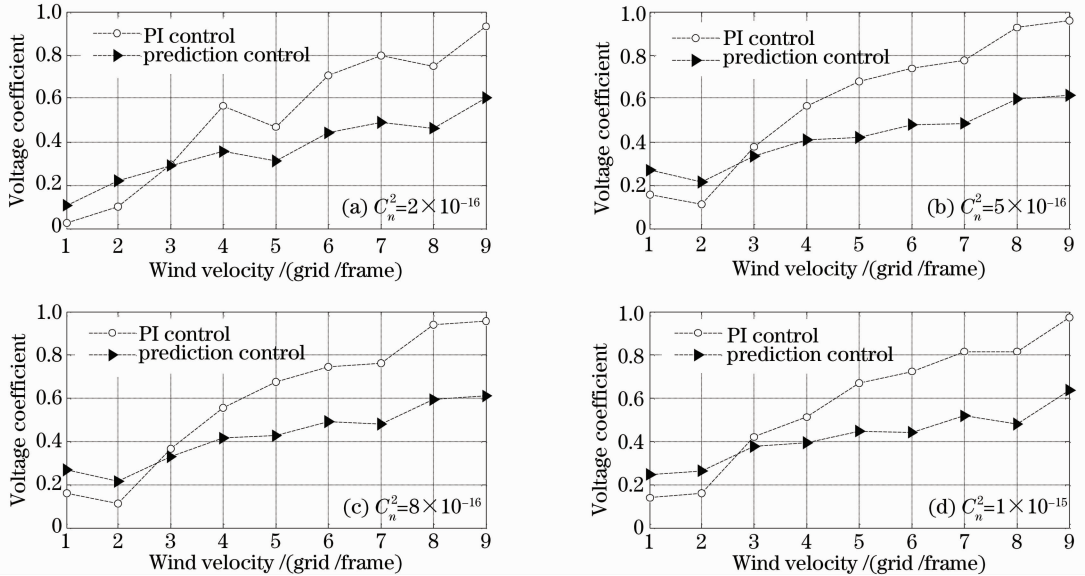


图 7 PI 控制算法和预测控制算法的仿真结果对比

Fig. 7 Comparison between the simulation results of prediction control algorithm and PI control algorithm

以上的仿真是针对单一风向和单一湍流强度的大气湍流相位屏而进行的,目的是为了分析和讨论风速大小和湍流强度大小对控制算法校正效果的影响。实际的大气湍流是多层结构,每层的风速方向存在差异,因此本文也对风速和湍流强度变化的大气湍流相位屏进行了仿真,以验证预测控制算法的有效性。表 5 是在 $R_{SN} = 1 \times 10^5$ 条件下的仿真结果。表 5 的前两行给出了 3 组湍流相位屏中的风速、风向和湍流强度数据:第一行是各个湍流相位屏中 X 方向上的风速大小,第二行是各个湍流相位屏中 Y 方向上的风速大小,第三行是各个湍流相位屏

中的湍流强度大小。第一组数据中风速在传输方向上逐渐增大,风向逐渐变化,湍流强度在传输方向上逐渐减弱;第二组数据中风速在传输方向上逐渐减小,风向逐渐变化,湍流强度在传输方向上逐渐增强;第三组数据中风速在传输方向上基本保持不变,方向逐渐变化,湍流强度在传输方向上逐渐减弱。表 5 最后两行是分别采用 PI 控制算法和预测控制算法闭环校正后的电压系数值。从表 5 中给出的仿真结果可以看到,在大气湍流相位屏中风速风向和湍流强度变化的情况下,预测控制算法比采用经典 PI 控制算法时的校正效果好。

表 5 一般条件下的 η_V 值变化情况

Table 5 η_V in general conditions

	Wind velocity /(grid/frame)									
X	2	5	6	3	2	1	5	3	4	
Y	2	3	4	6	4	3	2	4	3	
C_n^2	1×10^{-15}	5×10^{-16}	2×10^{-16}	2×10^{-16}	8×10^{-16}	1×10^{-15}	1×10^{-15}	8×10^{-16}	2×10^{-16}	
PI		0.7511			0.7954			0.8844		
Pre		0.5612			0.5297			0.5514		

根据文献[1,2]的分析,在一定采样频率和时间延迟的情况下,采用 PI 控制算法,AO 系统的控制

带宽是有限的。本文的研究表明,采用预测控制算法要比 PI 控制算法更显著地降低闭环环差,也就等

效于提高了 AO 系统的控制带宽。

6 结 论

本文介绍了自适应光学系统中电压预测控制的基本原理,并对预测控制算法和经典 PI 控制算法进行了仿真研究。仿真结果表明,预测控制可以有效地减少系统由伺服延迟引起的误差;这两种算法的校正效果都随着风速的加大逐渐变差,但相对经典 PI 控制算法无预测功能时的情况,预测控制算法的校正效果只在横向风速很小时比 PI 控制算法的校正效果差;预测控制算法适用范围比经典 PI 控制算法的适用范围更广,在风速很大时,经典 PI 控制算法已基本失效,但预测控制算法却依然有效。同时,对预测控制算法中 PI 控制器参数 b_0 对预测误差的影响进行了研究。研究表明,存在最优的 PI 控制系数 b_0 ,而且预测控制算法的最优 b_0 值较经典 PI 控制算法的最优 b_0 值变化范围小。

本文的仿真都是基于大气波前斜率数据进行的预测,而实际的系统是以大气湍流畸变波前为校正对象的。如何把这种方法用到实际的自适应光学系统上,以大气湍流畸变波前为校正对象,还需要进一步研究。下一步将针对实际大气传输中的场景,在更一般的条件下进行预测控制算法有效性的验证。由于本文的预测控制算法是基于递推最小二乘算法的,这种迭代算法可以在处理机中实现。处理机速度的提高和处理机存储器容量的提升给该算法的实际应用提供了保障,从而满足系统实时性要求。希望将来可以在实际的自适应光学系统中实现。

参 考 文 献

- 1 Li Xinyang, Jiang Wenhan. Effective bandwidth analysis of adaptive optics control system [J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, **17**(12): 1697~1702
李新阳,姜文汉. 自适应光学控制系统的有效带宽分析[J]. *光学学报*, 1997, **17**(12): 1697~1702
- 2 Li Xinyang, Jiang Wenhan. Analysis of the residual servo

- variance for an adaptive optics system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(10): 1328~1334
- 李新阳,姜文汉. 自适应光学系统的控制残余方差分析[J]. *光学学报*, 2000, **20**(10): 1328~1334
- 3 George J. M. Aitken, Deiphine Rossille, Donald R. McGaughey. Predictability of fractional-Brownian-motion wavefront distortions and some implications for closed-loop adaptive optics control[C]. *SPIE*, 1998, **3353**: 1060~1069
- 4 Mark B. Jorgenson, George J. M. Aitken. Prediction of atmospherically induced wave-front degradations[J]. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(7): 466~468
- 5 M. B. Jorgenson, G. J. M. Aitken. Neural network prediction of turbulence induced wave-front degradations with applications to adaptive optics[C]. *SPIE*, 1992, **1706**: 113~121
- 6 Dennis A. Montera, Byron M. Welsh, Michael C. Roggemann *et al.*. Use of artificial neural networks for Hartmann-sensor lenslet centroid estimation[J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(29): 5747~5757
- 7 Dennis A. Montera, Byron M. Welsh, Michael C. Roggemann *et al.*. Prediction of wavefront-sensor slope measurements with artificial neural networks [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(3): 675~681
- 8 Patrick C. McGuires, Troy A. Rhoadarmer, Hanna Coy *et al.*. Linear zonal atmospheric prediction for adaptive optics [C]. *SPIE*, 2000, **4007**: 682~691
- 9 Michael Lloyd-Hart, Patrick McGuire. Spatio-temporal prediction for adaptive optics wavefront reconstructors [C]. Adaptive Optics Topical Mtg. & Tabletop Exhibit, Technieai University of Munich, Garching, Germany, 1995
- 10 Zhang Xiujuan, Li Xinyang, Zhang Huiming. Prediction algorithm for atmosphere turbulence with control voltage of deformable mirror[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(5): 757~760
张秀娟,李新阳,张慧敏. 利用复原电压预测大气湍流畸变波前方法[J]. *强激光与粒子束*, 2006, **18**(5): 757~760
- 11 Li Xinyang, Wang Chunhong, Xian Hao *et al.*. Real-time modal reconstruction algorithm in adaptive optics [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, **14**(1): 53~56
李新阳,王春红,鲜浩等. 自适应光学系统的实时模式复原算法[J]. *强激光与粒子束*, 2002, **14**(1): 53~56
- 12 Li Xinyang, Jiang Wenhan, Wang Chunhong *et al.*. Real-time adaptive control algorithm in adaptive optics system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(3): 283~289
李新阳,姜文汉,王春红等. 自适应光学系统中的自适应控制算法研究[J]. *光学学报*, 2001, **21**(3): 283~289
- 13 Jiang Wenhan, Li Huaqiang. Hartman-Shack wavefront sensing and wavefront control algorithm[C]. *SPIE*, 1990, **1271**: 82~93
- 14 Li Qingquan. Theory, Design and Applications of Adaptive Control System[M]. Beijing: Science Press, 1990. 79~99
李清泉. 自适应控制系统理论、设计与应用[M]. 北京: 科技出版社, 1990. 79~99