

文章编号 1004-924X(2016)04-0771-09

液晶自适应光学系统中倾斜镜的建模与控制

王玉坤^{1*}, 胡立发¹, 王冲冲^{1,2}, 宣 丽¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100039)

摘要: 为了提高液晶自适应光学系统的波前探测精度, 研究了该系统中倾斜镜的校正方法。分析了液晶自适应光学系统中各环节的物理特性, 利用拉格朗日方程给出了倾斜镜系统模型的基本结构; 采用子空间辨识方法确定了模型参数, 同时利用非线性最小二乘算法对子空间模型的频域特性进行了修正。修正后模型幅频特性均方根误差为 0.024 5 dB, 相频特性均方根误差为 1.9008°。引入 Smith 控制策略来解决倾斜镜校正波前整体倾斜过程中的时滞问题; 利用子空间辨识出的模型分别进行 Smith 和 PID 的仿真和实验验证, 得到的结果与仿真计算相吻合, 即在相同稳定裕度的情况下, 采用 Smith 补偿 PID 算法的误差抑制带宽比传统 PID 算法提高了 23.97%。最后, 用提出的方法对一组湍流整体倾斜信号进行了校正。结果显示: 采用 Smith 补偿 PID 算法的控制精度比传统 PID 算法提高了 21.03%, 证实提出的方法优化了倾斜镜的校正精度, 保证了开环液晶自适应光学系统的波前探测精度。

关键词: 液晶自适应光学系统; 波前探测; 倾斜镜控制; 湍流倾斜校正; 子空间辨识

中图分类号: TH703; TH743 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162404.0771

Modeling and control of Tip/Tilt Mirror in liquid crystal adaptive optical system

WANG Yu-kun^{1*}, HU Li-fa¹, WANG Chong-chong^{1,2}, XUAN Li¹

(1. *State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

* *Corresponding author, E-mail: wangyukun@ciomp.ac.cn*

Abstract: To improve the wavefront detection accuracy of a liquid crystal adaptive optical system, a correction method for the Tip/Tilt Mirror (TTM) in the liquid crystal adaptive optical system was researched. The physical characteristics of each ingredient in the adaptive optical system were analyzed, and the basic structure of the TTM model was given based on the Lagrange equation. Then, the model parameters were acquired by using modified subspace identification method, and the frequency domain characteristics of a subspace model were corrected by nonlinear least squares algorithm. After correction, the transfer function precisions are 0.024 5 dB for the amplitude and 1.900 8° for the phase in middle and low frequency domains. Furthermore, Smith predictor was introduced to solve the time

收稿日期: 2015-07-20; 修订日期: 2015-09-07.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 11174274, No. 11174279, No. 61205021, No. 11204299, No. 61377032, No. 61378075)

delay problem during TTM correction. The model obtained by space identification was used in the simulation and experimental verification by Smith and PID. The experiment result is coincided with simulation result. It is shown that PID with the Smith predictor is superior to traditional PID, and the error residual bandwidth of Smith predictor is enhanced by 23.97% as compared with that of the traditional PID. Finally, a signal of turbulence Tip/Tilt was generated for a correction experiment, and the experimental result shows that the control precision of PID with Smith predictor is improved by 21.03% compared with that of traditional PID, which verifies that the proposed method optimizes the correction accuracy of the TTM and ensures the wavefront detection accuracy of the liquid crystal adaptive optical system.

Key words: liquid crystal adaptive optical system; wavefront detection ;control of tip/tilt mirror; turbulence tilt correction; subspace identification

1 引言

自适应光学技术是克服和补偿大气湍流影响最有效的措施之一^[1],它通过实时探测和校正因大气湍流等引起的动态波前畸变来提高光学系统克服动态扰动的能力,改善光学系统的成像质量。液晶用于波前畸变校正是利用了其电场作用下的折射率调制特性实现波前相位的调制,具有空间分辨率高、无机械运动、驱动电压低、价格低廉等优点,可有效避免变形镜驱动单元数不足和机械谐振等问题。液晶自适应系统需工作在偏振光下,同时色散严重使工作波段较窄,光能利用率不足 10%,为了解决光能损失问题,曹召良等提出开环控制的液晶自适应光学设计,避免了 50%的偏振光能损失^[2-4];由于采用开环工作方式,波前探测器中光斑是未校正的光斑,对高精度波前探测带来困难。

倾斜镜在液晶自适应光学中主要用于校正望远镜跟踪过程中机架抖动和大气干扰等引起的视轴抖动,即光束波前畸变整体倾斜的校正。在大气湍流引起的波前误差中,一阶项(整体倾斜)占 86.9%,二阶项(离焦和像散)占 6.7%,三阶及三阶以上只占 6.4%^[5],因此,提高整体倾斜校正精度对稳定光斑,提高波前探测精度具有重要意义。

本文分析了液晶自适应光学中倾斜镜系统各部分的物理特性,分析了倾斜镜的动力学特性,确定倾斜镜系统动力学模型的结构,利用子空间辨识方法^[6-8]得到动力学模型参数,同时使用最小二乘算法提高模型在频域的精度,为倾斜镜控制系

统的分析和设计奠定了基础。在液晶自适应光学系统中,由于曝光读出过程的影响使系统含有纯延迟,而 Smith 预估器^[9]能够有效克服系统纯延迟,且控制效果取决于被控对象精确的数学模型。因此,在获得上述数学模型后,本文采用 Smith 预估器方法分别进行倾斜镜系统波前倾斜校正的仿真和实验,对比传统积分控制器^[10-12],在相同稳定裕度的前提下,系统误差抑制带宽由 60.828 提高到 75.407 6,且仿真结果与实验一致。最后,生成一组湍流整体倾斜信号进行校正,得到了较好的控制效果,保证了开环液晶自适应光学系统的波前探测精度。

2 倾斜镜系统的物理机制分析

液晶自适应光学系统中,倾斜镜系统由波前探测器(WFS)、波前处理计算机(WFC)、数模转换器(DAC)、控制器(CC)、高压放大器(HVA)和倾斜镜(TTM)等组成,如图 1 所示,系统控制的目的是校正补偿由大气湍流引起的波前相位畸变,从而改善大气扰动作用下光学系统的成像质量。

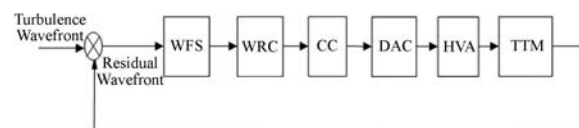


图 1 倾斜镜系统组成

Fig. 1 Block diagram of TTM system

波前探测器是用来测量曝光时间内波前相位的积分,传递函数可以表示为:

$$WFS(s) = \frac{1 - e^{-Ts}}{Ts}, \quad (1)$$

其中: T 为波前探测器的曝光时间,也是系统的采样频率。

波前计算机用来从波前探测器中读取信号,并进行波前重构,记读出和计算时间为 τ ,则波前计算机可以看作一个纯滞后环节,它的传递函数为:

$$WFC(s) = e^{-s\tau}. \quad (2)$$

数模转换器可以看作零阶保持器,它将控制电压在 1 个曝光周期 T 内保持不变,因此它的传递函数为:

$$DAC(s) = \frac{1 - e^{-Ts}}{s}. \quad (3)$$

高压放大器用来把转换器的输出低压值转换成高压值来驱动倾斜镜,它可以看做近似线性环节,因此可以看成纯比例环节表示。

倾斜镜内部结构如图 2 所示。压电作动器的内部作用机制如图 3 所示^[13]。

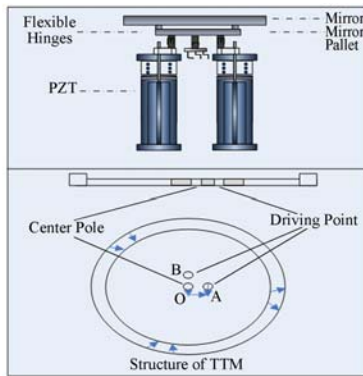


图 2 倾斜镜结构示意图

Fig. 2 Diagram of TTM structure

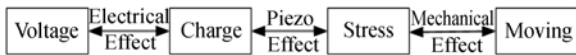


图 3 压电陶瓷的内部作用机制

Fig. 3 Mechanism of PZT

其中,压电陶瓷的输入电压与内部应力之间存在的迟滞非线性对系统动态特性影响小,近似为线性处理,如式(4)所示。因此,重点分析由柔性结构引入的动力学特性。

$$y \approx ku, \quad (4)$$

其中: y 为压电陶瓷轴向输出位移, k 为比例系数, u 为压电陶瓷输入电压。

以压电陶瓷的输出方向为 z 轴, ox 和 oy 分

别沿作动器安装点方向 OA 和 OB ,系统的动力学模型在 $o-xz$ 平面的投影如图 4 所示,由于 2 个驱动点分别位于两条相互垂直的直径上,相互之间是解耦的^[12],因此,系统在 $o-xz$ 平面的投影与系统在 $o-yz$ 平面的投影相同。设与镜面相连的 3 个柔性铰相同,其 2 个正交方向上的转动刚度 $K_{\theta_x} = K_{\theta_y} = K_{\theta}$,在图 4 中用扭转弹簧表示。柔性铰轴向刚度为 K_s ,压电陶瓷轴向刚度为 K_u 。

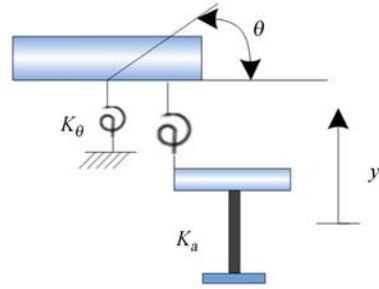


图 4 倾斜镜动力学模型

Fig. 4 Dynamic model of TTM

压电陶瓷在 z 向的输出位移为 y ,柔性连接距转动中心的距离为 l ,则镜面偏角为

$$\theta = \frac{y}{l}, \quad (5)$$

系统动能:

$$T = \frac{1}{2} J_{\theta_x} \cdot \dot{\theta}_x + \frac{1}{2} J_{\theta_y} \cdot \dot{\theta}_y + \frac{1}{2} m \cdot \dot{y}_{x0} + \frac{1}{2} m \cdot \dot{y}_{y0}, \quad (6)$$

其中: $J_{\theta_x}, J_{\theta_y}$ 分别为镜面绕 x 轴, y 轴的转动惯量。 θ_x, θ_y 为镜面绕 x 轴, y 轴的转角。 y_{x0}, y_{y0} 为压电陶瓷轴向输出位移。

系统势能:

$$V = \frac{3}{2} K_{\theta_x} \cdot \theta_x^2 + \frac{3}{2} K_{\theta_y} \cdot \theta_y^2 + \frac{1}{2} K_c \cdot y_{x0} + \frac{1}{2} K_c \cdot y_{y0}, \quad (7)$$

其中: $K_{\theta_x}, K_{\theta_y}$ 分别为柔性铰绕 x 轴, y 轴的转角刚度, $K_c = \frac{K_u \cdot K_s}{K_u + K_s}$ 。

$$L = T - V, \quad (8)$$

根据拉格朗日方程

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{dL}{dy} \right) + \frac{dL}{dy} = Q, \quad (9)$$

其中, $Q = K_c y_0$ 。

则:

$$\begin{cases} (J_{\theta_x} + ml_s^2) \cdot \ddot{\theta}_x + (3K_{\theta_x} + K_c \cdot l_s^2) \theta_x = K_c y_{x0} \\ (J_{\theta_y} + ml_s^2) \cdot \ddot{\theta}_y + (3K_{\theta_y} + K_c \cdot l_s^2) \theta_y = K_c y_{y0} \end{cases}, \quad (10)$$

考虑系统阻尼:

$$\begin{cases} (J_{\theta_x} + ml_s^2)C\ddot{\theta}_x + C\dot{\theta}_x + (3K_{\theta_x} + K_c \cdot l_s^2)\theta_x = K_c y_{x0} \\ (J_{\theta_y} + ml_s^2)C\ddot{\theta}_y + C\dot{\theta}_y + (3K_{\theta_y} + K_c \cdot l_s^2)\theta_y = K_c y_{y0} \end{cases}, \quad (11)$$

其中: $\frac{C}{J_{\theta} + ml_s^2} = 2\xi\omega_0$, $\omega_0 = 2\pi f$, C 为阻尼系数, ξ 为阻尼比, f 为固有频率。

根据参数整理方程得:

$$\begin{cases} \ddot{\theta}_x + c_x \dot{\theta}_x + p_x \theta_x = k_x y_{x0} \\ \ddot{\theta}_y + c_y \dot{\theta}_y + p_y \theta_y = k_y y_{y0} \end{cases}, \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \text{其中: } c_x &= \frac{C}{(J_{\theta_x} + ml_s^2)}, p_x = \frac{(3K_{\theta_x} + K_c \cdot l_s^2)}{(J_{\theta_x} + ml_s^2)}, \\ k_x &= \frac{K_c}{(J_{\theta_x} + ml_s^2)}, c_y = \frac{C}{(J_{\theta_y} + ml_s^2)}, p_y = \frac{(3K_{\theta_y} + K_c \cdot l_s^2)}{(J_{\theta_y} + ml_s^2)}, \\ k_y &= \frac{K_c}{(J_{\theta_y} + ml_s^2)}. \end{aligned}$$

结合式(4), σ - xz 平面和 σ - yz 平面从输入电压到压电陶瓷输出, 最终至偏转角度的传递函数表示为:

$$\begin{aligned} G_{x0} &= \frac{kk_x}{s^2 + c_x s + p_x} u_{x0}, \\ G_{y0} &= \frac{kk_y}{s^2 + c_y s + p_y} u_{y0} \end{aligned}, \quad (13)$$

由于绕 x 轴和绕 y 轴相互解耦, 所以只研究 1 个方向, 倾斜镜传递函数可表示为:

$$G_{TIM}(s) = \frac{kk_x}{s^2 + cs + p}. \quad (14)$$

因此, 整个倾斜镜系统的广义被控对象可描述为:

$$\begin{aligned} G(s) &= WFS(s)WRC(s)DAC(s)HVA(s)G_{TIM}(s) \\ &= \left(\frac{1 - e^{-T_s}}{T_s}\right)^2 e^{-\tau} k_{HVA} \frac{kk_x}{s^2 + cs + p} \approx \frac{Ke^{-(\tau+T_s)}}{s^2 + cs + p}, \end{aligned} \quad (15)$$

其中: $K = k \cdot k_x \cdot k_{HVA}$, $\left(\frac{1 - e^{-T_s}}{T_s}\right)^2 \approx e^{-T_s}$ 。

为了获得式(15)中的参数, 需要动力学方程的阻尼系数 ξ 及固有频率 ω_0 。理论上, 在压电陶瓷的所有结构参数都已知的情况下, 系统的一阶固有频率 $\omega_0 = 2\pi f$, 但对于实际系统, 精确的获得压电陶瓷的所有参数往往较为困难。同样无法求出压电陶瓷阻尼系数 ξ , 因此, 根据式(15)的模型结构, 采用子空间辨识的方法拟合模型参数。

3 子空间模型辨识^[6-8]

子空间模型辨识方法综合了系统理论、线性

代数和统计学思想, 仅仅依赖于简单可靠的线性代数工具, 直接由输入输出数据辨识线性时不变状态空间模型。

线性时不变系统状态空间描述:

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) = Bu(k) + Ke(k) \\ y(k) = Cx(k) + e(k) \end{cases}, \quad (16)$$

其中: x 为系统状态向量, u 为输入, y 为输出, e 为输出的一步线性预测误差。

线性时不变系统特性可以由 $[A, B, C, K]$ 四组参数表征, 令 $Y = [y(k), y(k+1), \dots, y(k+f-1)] \in \mathbb{R}^m$, $Z_f = [u(k), y(k), K, u(k+f-1), y(k+f-1)]' \in \mathbb{R}^n$, 则有:

$$\begin{cases} Y = O_f \cdot x(k) + T_f \cdot Z_f + E_f \\ E_f = [e(k), e(k+1), \dots, e(k+f-1)]' \end{cases}, \quad (17)$$

其中: O_f, T_f 为参数。

现在时刻状态 $x(k)$ 能够用 $k-p$ 时刻的状态 $x(k-p)$ 和向前推移 p 个时刻的输入输出序列 $Z_p = [u(k-p), y(k-p), K, u(k-1), y(k-1)]'$,

$$\begin{cases} O_f \cdot x(k) \approx H_p \cdot Z_p + E_p \\ E_p = [e(k-p), K, e(k-1)]' \end{cases}, \quad (18)$$

其中: H_p 为参数。

综合式(17)和式(18), 可得:

$$\begin{cases} Y = [H_p, T_f] \cdot Z + E \\ E = [e(k-p), K, e(k-1), e(k), e(k+1), K, e(k+f-1)] \\ Z = [u(k-p), y(k-p), K, u(k-1), y(k-1), u(k) \\ y(k), K, u(k+f-1), y(k+f-1)] \end{cases}, \quad (19)$$

其中: H_p, T_f 称为马尔科夫参数。

马尔科夫参数的辨识问题即是线性最小二乘问题, 由此得到马尔科夫参数 $[H_p, T_f]$ 的估计, 得到 H_p 估计后, 根据 $Q_f \cdot x(k) \approx H_p \cdot Z_p + E_p$ 对 $H_p \cdot Z_p$ 做奇异值分解, 得到状态 X 的估计; 由 $Y = C \cdot X + E$, 已知 Y 并得到状态 X 的估计, 因此 C 参数的估计也转化为最小二乘问题; 同时可以得到 E 的估计 Ed 。由 $x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + Ke(k)$ 已知 X 的估计值和 E 的估计值, A, B, K 的估计也转化为最小二乘问题; 从而得到 A, B, C, K 的估计。

4 Smith 预估器设计

传统的自适应光学控制算法常采用简单的纯

积分控制方式,但随着高帧频相机的发展,系统采样频率逐渐增大,这样由纯积分控制环节给系统带来的时间滞后将会明显降低系统的稳定裕度。Smith 预估控制能够有效克服系统时延,利用辨识出的倾斜镜系统模型,估计延迟时间内倾斜镜的偏转量,将估计出的偏转量补偿到波前探测器得到的误差中得到补偿后的偏转偏差,利用补偿后的偏差带入 PID 控制器进行驱动电压的计算。

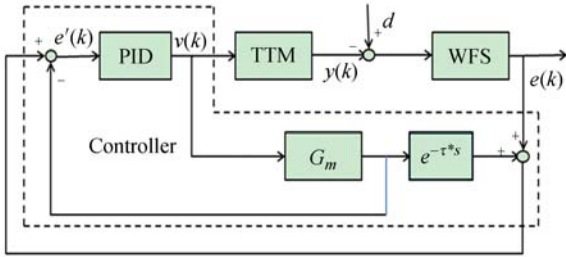


图 5 Smith 预估补偿控制原理图

Fig. 5 Block diagram of Smith predictor compensation control algorithm

Smith 预估补偿 PID 控制器可表示为:

$$\begin{cases} v(k) = v(k-1) + b_0 e'(k) + b_1 e'(k-1) + b_2 e'(k-2) \\ e'(k) = e(k) + y(k) - y(k-nT) \end{cases} \quad (20)$$

其中: $v(k)$ 为驱动电压, $b_0 = k_p + k_i + k_d$, $b_1 = -k_p - 2k_d$, $b_2 = k_d$, k_p 、 k_i 、 k_d 为 PID 参数, $e(k)$ 为探测到的残差, $e'(k)$ 为补偿后的残差, $y(k)$ 为辨识得到的模型输出, $y(k-nT)$ 为延 n 迟步的模型输出, T 为采样时间。

5 仿真与实验分析

以 PI 公司的 S330.2SL 型压电倾斜镜为控制对象,工业控制计算机为主控单元,波前探测器为倾斜镜输出偏移量测量单元,建立倾斜镜控制系统。S330.2SL 型压电倾斜镜的响应时间大约为 1 ms,波前探测器在帧转移模式下采样频率和压电倾斜镜施加电压频率都设置为 1.67 kHz,实验光路如图 6 所示,由倾斜镜 1 模拟波前的整体畸变,倾斜镜 2 进行实时校正。

5.1 子空间模型辨识

倾斜镜 1 和倾斜镜 2 均保持不动,测量波前探测器探测误差均方根为 0.001 4 pixel;倾斜镜 1 保持不动,向倾斜镜 2 一个轴施加随机数电压,

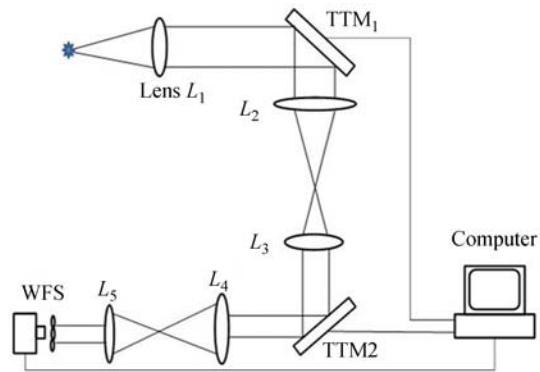


图 6 倾斜镜控制系统实验光路图

Fig. 6 Optical layout of TTM experiment system

用波前探测器测量倾斜镜 2 的响应,测量 5 000 组数据进行辨识。图 7 所示为部分建模结果,建模均方根误差为 0.008 5 pixel,建模精度为 99.361 0%。

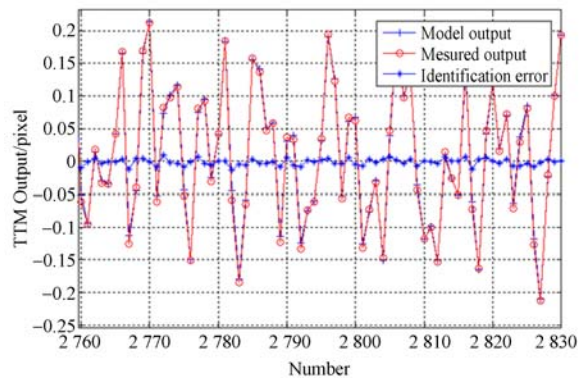


图 7 子空间辨识结果

Fig. 7 Subspace Identification Result

通常波前整体倾斜 300 Hz 以上成分不足 0.000 4%^[14],因此,子空间模型可以精确描述 300 Hz 以内的频率特性即可。测量一组以 1 Hz 为间隔,从 1~300 Hz 的频率响应。子空间模型关于频率是非线性的,使用非线性最小二乘法辨识参数,以幅频特性进行拟合,以相频特性辅助检验拟合结果。非线性最小二乘法使得式(21)达到最小或极小值:

$$J = \sqrt{\sum_{f=1}^{300} (Amp(f) - Amp(f, p))^2} \quad (21)$$

其中: $Amp(f)$ 为测量的幅频特性, $Amp(f, p)$ 子空间模型参数为 p 时模型的幅频特性。

图 8 所示为测量频率特性、子空间辨识模型的频率特性和经过非线性最小二乘修正后的频率

特性。图 9 所示为修正前后频率特性误差曲线。子空间模型幅频特性均方根误差为 0.151 5 dB,相频特性均方根误差为 2.123 5°;修正后模型幅频特性均方根误差为 0.024 5 dB,相频特性均方根误差为 1.900 8°。

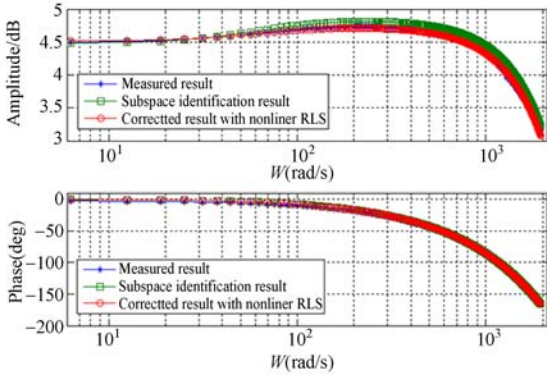


图 8 倾斜镜系统模型频域分析

Fig. 8 Modeling result of TTM system model

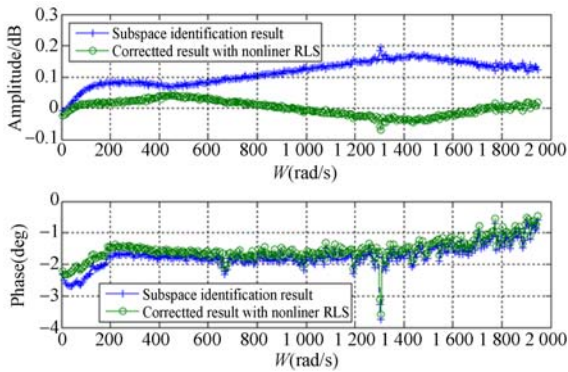


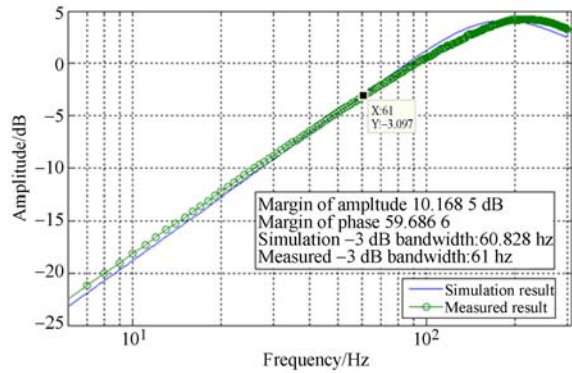
图 9 子空间模型和修正模型频率特性误差

Fig. 9 Frequency modeling error of subspace model and corrected model

5.2 仿真和实验分析

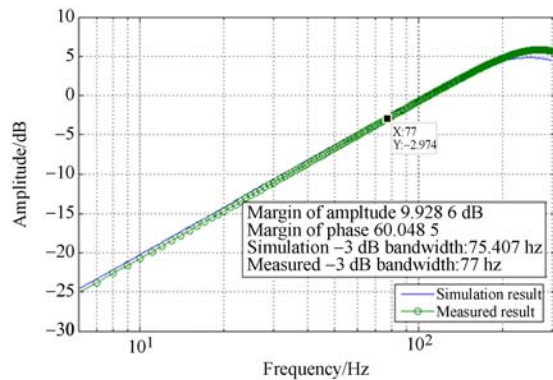
根据所建立倾斜镜系统模型,分别采用传统 PID 和 Smith 预估补偿 PID 作为控制器,对比相同稳定裕度时两种控制器的误差抑制带宽。首先进行仿真分析,然后以相同的控制器参数进行实验验证,如图 10 所示。

由图 10 可知,实验结果和仿真结果一致,说明子空间模型可以准确描述倾斜镜系统;传统 PID 控制器的相角裕度为 59.686 6°,幅值裕度 10.168 5 dB,系统误差抑制 -3 dB 带宽为 60.828 Hz。Smith 预估补偿 PID 的相角裕度为 60.048 5,幅值裕度为 7.928 6 dB,系统误差抑制 -3 dB 带宽为 75.407 6 Hz,实验结果表明,Smith 预



(a)传统 PID 控制误差抑制曲线

(a) Error Residual Bandwidth of traditional PID control



(b)Smith 预估控制误差抑制曲线

(b) Error Residual Bandwidth of Smith Predictor control

图 10 控制效果对比

Fig. 10 Control result comparison of different algorithm

估器可以有效克服延迟对系统带来的影响,在稳定性能相同的情况下,误差抑制带宽较传统 PID 提高 26%,提高了控制精度。

为了验证控制效果,分别使用传统 PID 和 Smith 预估补偿 PID 跟踪模拟产生的大气波前整体倾斜,比较控制结果。泰勒等^[14-15]研究了科尔莫格罗夫湍流畸变波前中整体倾斜的时间特性,得到了波前整体倾斜的时间功率谱。泰勒研究表明,波前整体倾斜的功率谱用 $\Phi_G(f)$ 表示,则在 x 轴和 y 轴方向的功率谱为 $\Phi_G(f)/2$ ^[14],它在低频段正比于频率的 $-2/3$ 次方,如式(22),在高频段正比于频率的 $-11/3$ 次方:

$$\frac{1}{2} \Phi_G(f) = 0.804 \sec(\psi) f^{-2/3} \int_0^L C_n^2(h) V(h)^{-1/3} dh, f \leq f_0, \quad (22)$$

$$\frac{1}{2} \Phi_G(f) = 0.011 \sec(\psi) f^{-11/3} \int_0^L C_n^2(h) V(h)^{8/3} dh, f > f_0, \quad (23)$$

其中: ψ 为天顶角; D 为望远镜口径; $V(h)$ 为风速模型; $C_n^2(h)$ 为折射率常数; L 为传输路径长度; f 为时间频率; f_0 为高低频段交界频率。功率谱单位为 rad^2/Hz ,如果认为传输路径上风速和折射率常数不变,得到: $f_0=0.239V/D$ 。

由于长度为 N 、采样间隔为 T 的信号的功率谱幅值 $|\Phi_G(f)|$ 与幅值谱 $|R(f)|$ 满足:

$$|\Phi_G(f)| = |R(f)|^2 / NT. \quad (24)$$

因此,根据式(22),(23)和(24)式可得出大气流整体倾斜幅值谱。得到满足给定功率谱的随机信号的幅值谱后,再经过傅里叶逆变换就可以得出对应的时域随机信号。

假定望远镜的主口径为 1.23 m;波长为 632.8 nm;天顶角为 0° ;波前探测器的采样频率为 1.67 kHz;等效时间延迟为 1.2 ms(2 个采样周期);折射率常数为 1.1141×10^{-12} ,横向风速在传输路径上为 30 m/s,传输路径长度为 10 000 m。倾斜镜 1 模拟产生湍流整体倾斜,倾斜镜 2 作为波前校正器,校正由倾斜镜 1 产生的波前整体倾斜。图 11 所示为大气湍流功率谱和校正后残余波前倾斜的功率谱,图 12 所示为时域的跟踪效果。

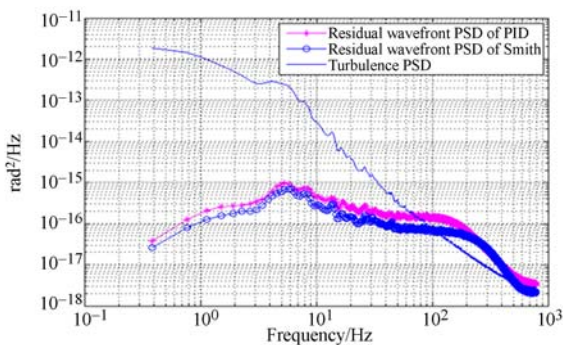


图 11 大气湍流波前整体倾斜功率谱和校正后残余波前倾斜功率谱

Fig. 11 Power spectrum of atmospheric turbulence wavefront gradient tilt and residual wavefront gradient tilt

仿真大气湍流整体倾斜的均方根误差为 1.9640×10^{-6} rad,采用传统 PID 校正后均方根

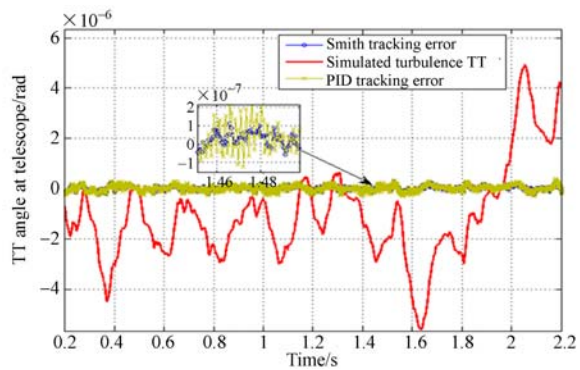


图 12 大气湍流波前整体倾斜时域校正效果

Fig. 12 Correction result of atmospheric turbulence wavefront gradient tilt in time domain

误差为 1.1654×10^{-7} rad,为仿真大气湍流整体倾斜均方根误差的 0.059 3 倍;采用 Smith 预估补偿 PID 校正后均方根误差为 9.2028×10^{-8} rad,为仿真大气湍流整体倾斜均方根误差的 0.046 9 倍。可见,Smith 预估补偿 PID 明显好于传统 PID 方法,控制精度提高约 21.03%。

6 结 论

本文首先分析了液晶自适应光学系统各环节的物理特性,给出了倾斜镜系统模型的基本结构,采用子空间辨识的方法确定模型参数,时域建模精度达到 99.361 0%,幅频特性均方根误差为 0.151 5 dB,相频特性均方根误差为 2.1235° ;利用非线性最小二乘算法对子空间模型的频域特性进行修正,修正后模型幅频特性均方根误差为 0.024 5 dB,相频特性均方根误差为 1.9008° ,为控制系统的分析和设计奠定基础;利用该模型进行 Smith 补偿 PID 控制的仿真和实验验证,并与传统 PID 进行对比,仿真和实验结果一致;结果表明,在相同稳定裕度的情况下,采用 Smith 补偿 PID 算法的误差抑制带宽比传统 PID 提高 23.97%。最后,生成一组湍流整体倾斜信号进行校正,采用 Smith 补偿 PID 算法的控制精度比传统 PID 提高 21.03%,提高了倾斜镜的校正精度,保证了开环液晶自适应光学系统的波前探测精度。

参考文献:

- [1] TYSON R K. *Introduction to Adaptive Optics* [M]. SPIE Press, Bellingham, Washington, 2000.
- [2] CAO Z, MU Q, HU L, *et al.*. Optimal energy-splitting method for an openloop liquid crystal adaptive optics system[J]. *Opt. Express*, 2012, 17(20): 19331-19342.
- [3] MU Q, CAO Z, HU L, *et al.*. Open loop adaptive optics testbed on 2.16 meter telescope with liquid crystal corrector [J]. *Optics Communications*, 2012, 285: 896-899.
- [4] ZHANG X, HU L, CAO Z, *et al.*. Improve the accuracy of interaction matrix measurement for liquid-crystal adaptive optics systems[J]. *Opt. Express*, 2014, 12(22), 14221-14228.
- [5] DAO G M. Zernike annular polynomials and atmospheric turbulence[J]. *Opt. Soc. Am.*, 2007, 24(1): 139-155.
- [6] GANDINO E, GARIBALDI L, MARCHESIELLO S. Covariance-driven subspace identification: A complete input-output approach[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2013(26): 377-391.
- [7] LIU T, SHAO C, WANG X Z. Consistency. Analysis of orthogonal projection based closed-loop subspace identification methods[C]. *European Control Conference*, 2013: 149-155.
- [8] ALESSANDRO C, ENRICO M. Dynamic calibration of adaptive optics systems: A system identification approach[C]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2010, 3(18).
- [9] AXEL L H. *Performance and Robustness of Smith Predictor Control and Comparison with PID-control* [D]. Norwegian University of Science and Technology Department of Chemical Engineering, 2013.
- [10] GUIDO A, GIORGIO B, DANIELE M, *et al.*. Frequency based design of modal controllers for adaptive optics systems[J]. *Opt. Express*, 2012, 24(20): 27108-27122.
- [11] WANG CH CH, HU L F, WANG Y K. Time delay compensation method for tip-tilt control in adaptive optics system[J]. *Applied Optics*, 2015(54): 3383-3388.
- [12] JOHN Y, DAVID B, MARTIN F. The performance of the MROI fast tip-tilt correction system [J]. *Proc. of SPIE*, 2014: 91461Z-1.
- [13] 刘泊, 郭建英, 孙永全. 压电陶瓷微位移驱动器建模与控制[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(6): 1503-1509.
- LIU B, GUO J Y, SUN Y Q. Modeling and control for PZT micro-displacement actuator[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(6): 1503-1509. (in Chinese)
- [14] TYLER G A. Bandwidth consideration for tracking through turbulence[J]. *J. Opt. Soc. A. m.*, 1994, 11(1): 358-367.
- [15] LI X Y, JIANG W H, WANG C H. Power spectra analysis of the disturbed wave front in laser beam horizontal atmospheric propagation I: wavefront overall tilt and tyler frequency [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, 20, 883-889.
- [16] MICHEL V V. *Filtering and System Identification: A Least Squares Approach* [M]. Cambridge University Press, 2007, 111-112.
- [17] SERGE M, CYRIL P. Tip-tilt disturbance model identification for Kalman-based control scheme: application to XAO and ELT systems [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 2010, 11(27): A122-A132.
- [18] 丁科, 黄永梅, 马佳光, 等. 抑制光束抖动的快速反射镜复合控制[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(9): 1991-1998.
- DING K, HUANG Y M, MA J G, *et al.*. Composite control of fast-steering-mirror for beam jitter [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(9): 1991-1998. (in Chinese)
- [19] 廖洪波, 范世珣, 黑墨, 等. 光电稳定平台伺服系统动力学建模与参数辨识[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(2): 477-484.

- LIAO H B, FAN SH X, HEI M, *et al.*. Modeling and parameter identification for electro-optical stabilized platform servo systems[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(2):477-484. (in Chinese)
- [20] 朱明超,刘慧,张鑫,等. 惯性稳定平台自适应前馈控制[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(1):141-148.
- ZHU M CH, LIU H, ZHANG X, *et al.*. Adaptive feed -forward control for inertially stabilized platform[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(1): 141-148. (in Chinese)
- [21] 赵建远,李醒飞,田凌子. 动力调谐陀螺仪子空间辨识[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(2):423-429.
- ZHAO J Y, LI X F, TIAN L Z. Subspace identification for dynamically tuned gyroscope[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(2): 423-429. (in Chinese).

作者简介:



王玉坤(1988—),男,内蒙古呼伦贝尔人,硕士,研究实习员,2013年于北京航空航天大学获得硕士学位,主要从自适应光学系统中自动控制方面的研究。
E-mail: wangyukun@ciomp.ac.cn



宣丽(1957—),女,江苏常州人,博士,研究员,博士生导师,1983年于吉林大学获学士学位,1986年于中国科学院长春物理研究所获硕士学位,1998年于日本东北大学获工学博士学位,1999年入选中国科学院百人计划,主要从事液晶自适应光学、液晶光学器件及液晶高分子化学等方面的研究。
E-mail: xuanli@ciomp.ac.cn