

基于滤波型线性自抗扰预估的倾斜镜控制方法

孔令曦^{1,2,3,4}, 程涛^{1,2*}, 苏春轩^{1,2}, 杨康建^{1,2}, 赵孟孟^{1,2,4}, 王帅^{1,2}, 杨平^{1,2*}¹中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209;²中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;³中国科学院大学电子电气与通信工程学院, 北京 100049;⁴中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为提高自适应光学(AO)系统中倾斜镜(TTM)的控制性能,提出了一种基于滤波的线性自抗扰预估控制(FLADRC-Smith)方法。该方法利用Smith预估器提升了系统误差抑制带宽,同时设计滤波环节修正TTM控制量,保证系统对高频扰动信号的抑制性能。仿真建立AO倾斜校正模型对该方法进行验证,结果表明,所提方法能有效提高系统带宽和TTM动态响应性能。在纯时滞系统中,该方法相较于比例-积分(PI)控制将系统的误差抑制带宽提升了4.56倍;在同等误差抑制带宽条件下,将该方法在纯时滞系统和二阶振荡时滞系统中与比例积分预估(PI-Smith)控制方法对比,系统抑制内外部扰动能力更强,TTM的动态响应性能提升了20%以上。

关键词 自适应光学; 倾斜镜; 时滞系统; 自抗扰

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL221516

1 引言

自适应光学(AO)系统中,倾斜镜(TTM)可以通过镜面偏转使光束产生快速、小角度的倾斜变化,从而精确地校正倾斜像差,已经被广泛应用于光束净化、精密跟踪、激光通信等领域^[1-4]。高带宽、高动态响应的TTM控制是保证精确倾斜校正的关键^[5-6]。然而,由于数据采集、传输和计算等原因,使得AO系统中存在2~3倍采样周期的时间延迟 τ ,该延迟限制了系统带宽的提升^[7]。此外,实验器件自身振动、工作环境不稳定^[8-10]等引起的外部扰动以及由模型时滞参数的时变等导致的内部扰动,会降低TTM的动态响应性能。因此,需同步补偿时滞和内外部扰动对系统倾斜校正性能的影响,以实现AO系统中高带宽、高动态响应的TTM控制。

为解决时滞及扰动对TTM控制性能的影响,国内外学者开展了一系列的控制方法研究。针对时滞问题,文献[11]考虑到时间延迟的限制,在有限带宽的情况下,使用多闭环回路控制方法提高了系统的闭环校正性能,但本质上并未提升系统带宽;文献[7]在比例-积分(PI)控制的基础上进行了Smith预估以补偿时间延迟对系统校正性能的影响,结果表明,Smith预估控制方法可提升系统带宽,但PI控制难以克服因

Smith补偿参数与系统时滞参数失配对系统校正性能产生的影响,控制性能与系统内部扰动相关。为解决内外部扰动对TTM动态响应性能的影响,文献[12]使用前馈控制方法有效抵消了系统外部扰动,但未补偿时间延迟的影响,控制方法的性能受限;线性二次高斯(LQG)控制、混合控制等策略有效地实现了光束抖动抑制^[13-15],但其控制性能取决于模型建立的精确性,需对光束抖动进行实时辨识,对计算的实时性和准确度要求苛刻^[15];文献[16]在光通信系统中,通过改进的线性自抗扰控制(LADRC)方法优化系统的输出估计量,提高了系统抗扰动能力和快反镜的跟踪性能,但在其研究中未考虑时间延迟因素。

为同步补偿系统时滞和内外部扰动对TTM控制的影响,本文提出一种基于滤波的线性自抗扰预估控制(FLADRC-Smith)方法,利用Smith预估器提升系统误差抑制带宽,同时设计滤波环节保证系统对内部扰动和外部扰动的抑制能力。此外,从频域角度分析了AO模型时滞参数变化时控制系统的稳定性以及在受到外部干扰时系统的抗扰特性,据此给出控制参数整定依据,并通过建立AO倾斜校正的仿真模型对FLADRC-Smith控制方法的有效性进行了验证。

收稿日期: 2022-12-12; 修回日期: 2023-01-20; 录用日期: 2023-02-06; 网络首发日期: 2023-03-09

基金项目: 国家自然科学基金(62005285, 62105336)、国防科技卓越青年人才基金、中国科学院“西部之光”人才培养计划(中国科学院西部青年学者A类)

通信作者: *pingyang2516@163.com; **chengtaowusang@163.com

2 FLADRC-Smith 控制方法设计原理及参数整定规则

图 1 所示为设计 LADRC 用于 AO 倾斜校正系统的控制框图。图 1 中 r 为光束抖动信号输入量, y 是 TTM 的偏转角度输出量, e 为残余误差, d 为外界的扰动信号量, u 为 TTM 的电压控制量, y 相对于 u 在时域上的时间延迟为 τ (单位 s), 该延迟主要由探测、数据读取与计算等原因导致。

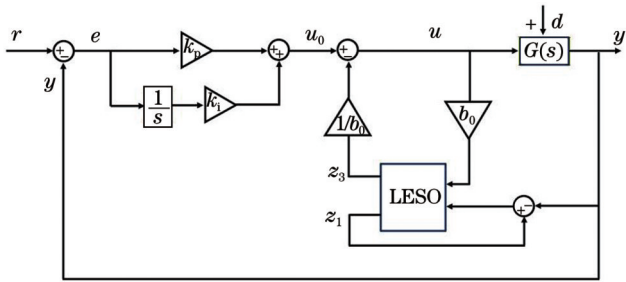


图 1 基于 LADRC 的 AO 倾斜控制框图

Fig. 1 Block diagram of AO tip-tilt control using LADRC

若将系统视作线性系统, 则该系统可等效为相位纯滞后系统, 其简化模型表示为

$$G(s) = K_0 e^{-\tau s}, \quad (1)$$

式中: K_0 为倾斜镜的传递函数, 一般取 $K_0 = 1$ 。

模型中 τ 的不确定性和来自外界的干扰 d 分别为内部扰动和外部扰动。LADRC 中的线性扩张状态观测器 (LESO) 可将内部扰动和外部扰动统一视为扰动进行估计并反向补偿, 本文中二阶 LESO 为例^[17]:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = -\beta_{01}(z_1 - y) + z_2 \\ \dot{z}_2 = -\beta_{02}(z_1 - y) + z_3 + b_0 u, \\ \dot{z}_3 = -\beta_{03}(z_1 - y) \end{cases} \quad (2)$$

式中: b_0 为系统增益; z_1 为 y 的观测值; z_2 是过程变量; z_3 为系统对扰动量的估计值; \dot{z} 为求导运算; $\beta_{01}, \beta_{02}, \beta_{03}$ 为待设计参数, 满足

$$(s + \omega_0)^3 = s^3 + \beta_{01}s^2 + \beta_{02}s + \beta_{03}, \quad (3)$$

式中: ω_0 为 LESO 的带宽, 单位为 rad/s。

根据式 (3), 可解得 $\beta_{01} = 3\omega_0, \beta_{02} = 3\omega_0^2, \beta_{03} = \omega_0^3$ 。控制律部分继承 PI 控制的优势:

$$M_{\text{FLADRC-Smith}}(s) = \frac{G_0 G_1' G}{1 + G_1' (G_0 + H)(G + G_d)} = \frac{\omega_c (s + \omega_0)^3 (k_p s + k_i) e^{-\tau s}}{B(s)}, \quad (6)$$

式中:

$$B(s) = s^2 [s^3 + (3\omega_0 + \omega_c)s^2 + (3\omega_0^2 + 3\omega_0\omega_c)s + (\omega_0^3 + 3\omega_0^2\omega_c)] + \left[\omega_c (s + \omega_0)^3 (k_p s + k_i) + \frac{\omega_0^3 \omega_c}{b_0} s^3 \right] \cdot [e^{-\tau s} + (1 - e^{-\tau s})].$$

当 $b_0 \gg \omega_0^3$ 与 $k_i \rightarrow 0$ 成立时, $B(s)$ 存在极点 $-\frac{k_i}{k_p}$ 与

$$\begin{cases} u_0 = \left(k_p + \frac{k_i}{s} \right) e \\ u = u_0 - \frac{z_3}{b_0} \end{cases}, \quad (4)$$

式中: k_p, k_i 为 LADRC 的参数; u_0 为控制律输出; 通过 z_3 即可对控制量 u 进行修正。

为方便分析, 对式 (2) 及式 (4) 进行合并推导, 可得:

$$u = G_1 [G_0 r - (G_0 + H)y], \quad (5)$$

式中: $G_0 = k_p + \frac{k_i}{s}$; $G_1 = \frac{(s + \omega_0)^3}{s^3 + 3\omega_0 s^2 + 3\omega_0^2 s}$; $H = \frac{\omega_0^3}{b_0} \frac{s^2}{(s + \omega_0)^3}$ 。

考虑到 Smith 预估可以提升 AO 系统带宽, 在 LADRC 控制器中增加 Smith 控制环节 $G_d(s) = K_0(1 - e^{-\tau_1 s})$, 其中 τ_1 为 Smith 控制器对系统时滞的预估量。同时, 为了保证控制回路对高频扰动信号的抑制能力, 设计式如 $G_f(s) = \frac{1}{s/\omega_c + 1}$ 的一阶低通滤波器修正控制量 u , 该滤波器 $G_f(s)$ 的截止频率为 ω_c , 则式 (4) 修正为 $u = \left(u_0 - \frac{z_3}{b_0} \right) G_f$, G_1 修正为 $G_1' = \frac{\omega_c (s + \omega_0)^3}{s^4 + (3\omega_0 + \omega_c)s^3 + (3\omega_0^2 + 3\omega_0\omega_c)s^2 + (\omega_0^3 + 3\omega_0^2\omega_c)s}$ 。

再结合式 (5), 即可得 FLADRC-Smith 控制器作用于 AO 倾斜校正系统的简化控制结构图, 如图 2 所示。

根据图 2, 易得该反馈系统的闭环传递函数 $M_{\text{FLADRC-Smith}}(s)$ 为

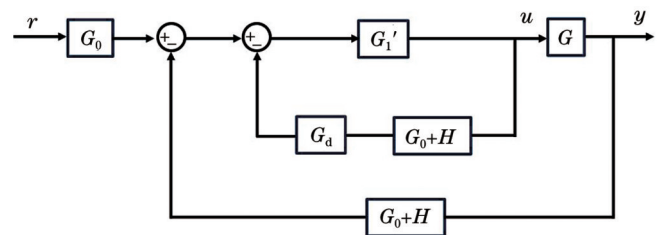


图 2 基于 FLADRC-Smith 的 AO 倾斜控制简化框图

Fig. 2 Simplified block diagram of AO tip-tilt control using FLADRC-Smith

零点相消, 此时可通过极点配置将系统的闭环极点配置于期望极点, 从而获得良好的控制性能。据此设计

比例因子 $0 < \mu < 1$, 当 $\omega_c \approx \mu \frac{\omega_0}{k_p}$ 时, 调整 ω_0 及 μ , 即可获得期望极点, 其值约为 $\mu\omega_0$ 。

3 FLADRC-Smith 控制方法稳定性与抗扰特性分析

3.1 模型变化时的稳定性分析

将式(6)定义为 $M_{\text{FLADRC-Smith}}(s) = M_1(s)e^{-\tau s}$, 时滞环节 $e^{-\tau s}$ 的频域特性可表达为

$$e^{-\tau s} \Big|_{s=j\omega} = e^{-j\tau\omega} = 1(-\tau\omega), \quad (7)$$

式中: 1 为时滞环节的幅频特性, $-\tau\omega$ 为其相频特性, 单位为 rad。

式(7)表明, 时间延迟仅影响 $M_{\text{FLADRC-Smith}}$ 的相频特性, 不影响其幅频特性。利用指数函数泰勒展开的一阶近似 $e^{-\tau s} \approx 1 - \tau s$, 可得

$$M_1(s) \approx \frac{\omega_c(s + \omega_0)^3(k_p s + k_i)}{B_1(s)}, \quad (8)$$

式中:

$$B_1(s) = s^2[s^3 + (3\omega_0 + \omega_c)s^2 + (3\omega_0^2 + 3\omega_0\omega_c)s + (\omega_0^3 + 3\omega_0^2\omega_c)] + \left[\omega_c(s + \omega_0)^3(k_p s + k_i) + \frac{\omega_0^3\omega_c}{b_0}s^3 \right] \cdot [1 + (\tau_1 - \tau)]. \quad (9)$$

通过劳斯判据对 M_1 的特征方程 $B_1(s) = 0$ 进行参数约束, 结合 b_0, ω_c, k_i 的取值范围, 可得

$$(\tau_1 - \tau) > -\frac{1}{k_p\omega_c}, \quad (10)$$

$$k_p > \max\left(\frac{\omega_0}{\sqrt{3}\omega_c}, \frac{3\omega_0 + \omega_c}{\omega_0^2\omega_c}\right). \quad (11)$$

因此, 为保证系统的稳定性, 参数的选取应满足式(10)及式(11)。

3.2 抗扰特性分析

当 Smith 预估参数与系统时滞保持一致, 即 $\tau = \tau_1$ 时, 仅考虑外部干扰, 其表现为图 1 中的扰动量 d 。为分析 d 对 TTM 控制性能的影响, 可根据如图 3 所示的控制框图计算出外部干扰对系统输出的影响为

$$M_{df}(s) = \frac{G + G_1'(G_0 + H)GG_d}{1 + G_1'(G_0 + H)(G + G_d)} = \frac{G + G_1'(G_0 + H)GG_d}{1 + G_1'(G_0 + H)}. \quad (12)$$

需要强调的是, 由于 AO 系统模型只涉及纯时滞环节, 根据图 4 所示光束抖动输入信号到残差信号的控制框图, 可以得出如式(13)所示的系统误差传递函数, 其反映的是控制系统的稳态误差:

$$M_{ef}(s) = \frac{1 + G_1'(G_0 + H)G_d}{1 + G_1'(G_0 + H)(G + G_d)} = \frac{1 + G_1'(G_0 + H)G_d}{1 + G_1'(G_0 + H)} = \frac{B'(s)}{B(s)}, \quad (13)$$

式中: $B'(s) = s^2[s^3 + (3\omega_0 + \omega_c)s^2 + (3\omega_0^2 + 3\omega_0\omega_c)s + (\omega_0^3 + 3\omega_0^2\omega_c)]$ 。

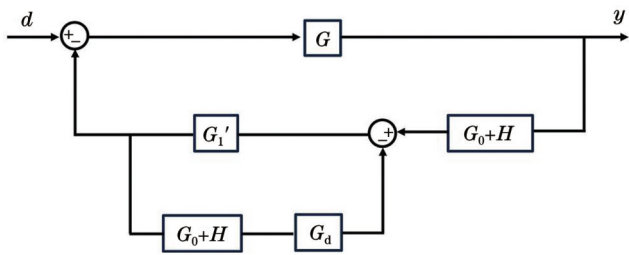


图 3 d 到 y 的简化控制框图

Fig. 3 Simplified control block diagram from d to y

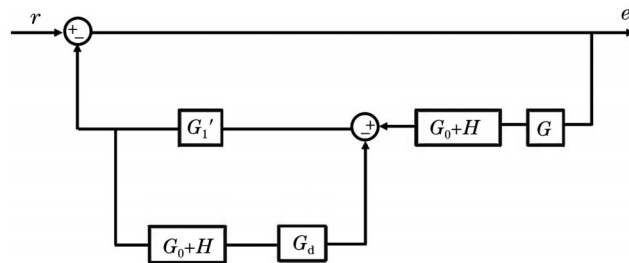


图 4 r 到 e 的简化控制框图

Fig. 4 Simplified control block diagram from r to e

若仅考虑时滞环节的幅频特性, M_{ef} 与 M_{df} 的幅频特性均可表示为 $\frac{1}{1 + G_1'(G_0 + H)}$ 。因此, 在 AO 倾斜校正系统中, 控制系统对外部扰动的抑制能力与对误差的抑制能力相同, 故可统一使用误差抑制带宽, 即误差传递函数幅频曲线过 -3 dB 点的频率, 表征系统的抗扰能力。

对比式(13)与式(6)可知, 系统闭环传递函数与误差传递函数具有相同的极点成分, 当 $\omega_c \approx \mu \frac{\omega_0}{k_p}$ 成立时, 可近似认为系统的误差抑制带宽为 $\mu\omega_0$ 。根据误差抑制带宽的大小, 可评价系统的抗扰性能。

对比式(13)与式(6)可知, 系统闭环传递函数与误差传递函数具有相同的极点成分, 当 $\omega_c \approx \mu \frac{\omega_0}{k_p}$ 成立时, 可近似认为系统的误差抑制带宽为 $\mu\omega_0$ 。根据误差抑制带宽的大小, 可评价系统的抗扰性能。

4 仿真对比验证

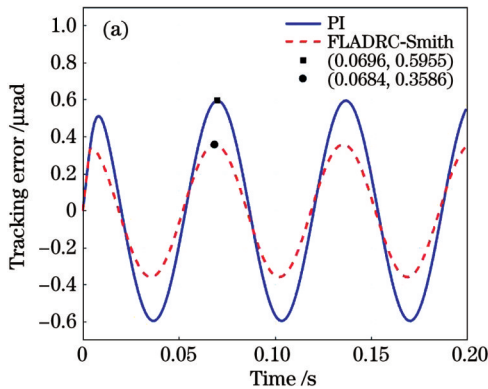
为验证 FLADRC-Smith 控制方法的有效性, 本文采用 MATLAB/Simulink 在如式(14)所示的 AO 倾斜校正模型中开展了 FLADRC-Smith 与 PI 及比例积分预估 (PI-Smith) 的对比仿真实验:

$$G_{AO}(s) = e^{-0.0025s}. \quad (14)$$

设置 Simulink 采样步长为 0.0012 s, 求解器选用欧拉积分 ode1 模式, 模型中时间延迟约为 2 倍采样周期, 即 $\tau = 0.0025$ s。在仿真中, FLADRC-Smith 和 PI-Smith 控制器中 Smith 预估器的参数设定为 $\tau_1 = 0.0025$ s。

4.1 FLADRC-Smith 控制方法与 PI 控制方法对比

当 AO 模型中时间延迟未改变, 即 $\tau = \tau_1$ 时, 因式 (14) 与文献 [7] 中模型相近, 通过调节 PI 控制器的参数, 使系统的误差抑制带宽与文献 [7] 中的计算值 25 Hz 保持一致。假设输入光束抖动信号是幅值为 1 μrad 、频率为 1 Hz 的正弦信号, 在两种控制方法下, 调节控制器参数, 使 TTM 输出偏转角度跟踪上光束抖动信号。PI 控制器参数选取 $K_p = 0$, $K_i = 157$; FLADRC-Smith 控制器参数整定为 $\omega_0 = 1000$ rad/s, $\mu = 0.7$, $k_p = 35$ 。在 FLADRC-Smith 控制下, 系统的误差抑制带宽理论值约为 111.4 Hz。



保持控制器参数与输入抖动信号幅值不变, 将输入信号的频率提升至 15 Hz。图 5(a) 为 PI 与 FLADRC-Smith 控制下, TTM 的实际偏转角度跟踪输入抖动信号的残差信号, 可看出使用 FLADRC-Smith 时产生的残差量比 PI 控制下减小了 39.7%, 同时 FLADRC-Smith 控制下 TTM 响应的速度比 PI 控制下快了 0.0012 s, 即一个采样周期的时长。进一步提升输入信号的频率至 35 Hz, 对应的结果如图 5(b) 所示。从图 5(b) 可以看出, FLADRC-Smith 控制下产生的残差量比 PI 控制下小, 同时 FLADRC-Smith 控制下 TTM 响应的速度比 PI 控制下快了 0.0024 s, 即两个采样周期的时长。图 5 说明, 随着输入抖动信号频率的提升, PI 控制下 TTM 的响应滞后量逐渐增大, 而 FLADRC-Smith 控制下 TTM 响应速度快, 跟踪精度高, 可稳定跟踪输入抖动信号的频率范围大。

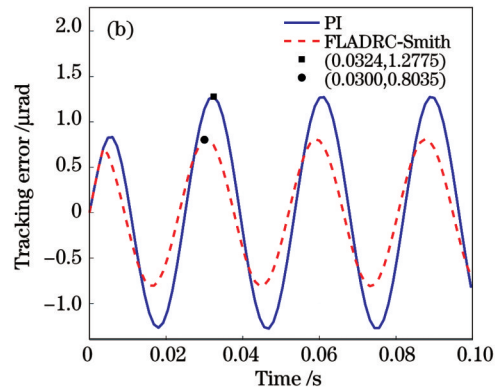


图 5 不同输入信号频率下 FLADRC-Smith 控制和 PI 控制跟踪误差对比。(a) 15 Hz; (b) 35 Hz

Fig. 5 Comparison of tracking error between FLADRC-Smith control and PI control for different input signal frequencies. (a) 15 Hz;

(b) 35 Hz

根据系统特性, 绘出 PI 控制与 FLADRC-Smith 控制下系统误差传递函数的 Bode 图, 如图 6 所示。PI 控制时, 系统的误差抑制带宽为 25 Hz, 小于抖动信号频率 35 Hz, 因此跟踪性能差。而 FLADRC-Smith 控制时, 误差抑制带宽达到了 114 Hz, 与计算值相近, 远大于 35 Hz, 因此表现出了稳定跟踪的优势。根据图 6 的结果可知, 相比于 PI 控制, FLADRC-Smith 控制下系统的误差抑制带宽提升了 4.56 倍, 扩大了 TTM 能跟踪的光束抖动信号频率范围, 跟踪能力更强。

另外, 保持控制器参数不变, 使 TTM 跟踪定值 1 μrad 以验证 TTM 的响应性能, 同时在 0.1 s 时处加入阶跃扰动。图 7 为在两种控制方法下 TTM 跟踪定值的能力及抑制外部扰动能力对比, 可以看出 FLADRC-Smith 控制下系统抑制外部扰动能力更强, TTM 的响应速度更快, 且实现了无超调稳定跟踪, 弥补了快速性与超调之间的矛盾。

4.2 FLADRC-Smith 控制方法与 PI-Smith 控制方法对比

Smith 预估可以提升 AO 系统的带宽, 因此, 令 PI-

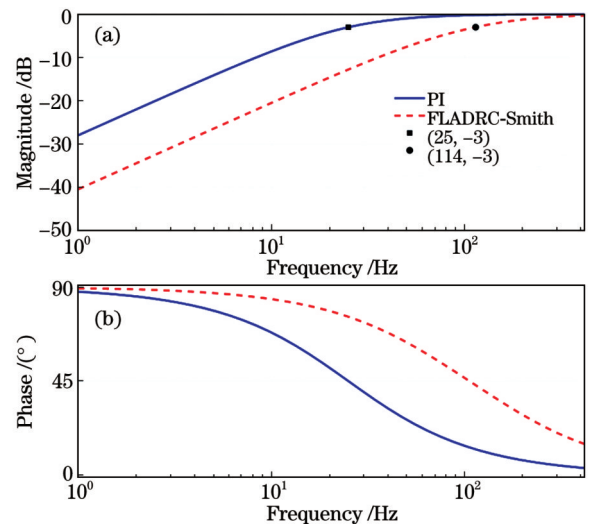


图 6 FLADRC-Smith 控制和 PI 控制下系统频域特性比较。

(a) 幅频特性; (b) 相频特性

Fig. 6 Comparison of system frequency domain characteristics using FLADRC-Smith control and PI control. (a) Magnitude-frequency characteristics; (b) phase-frequency characteristics

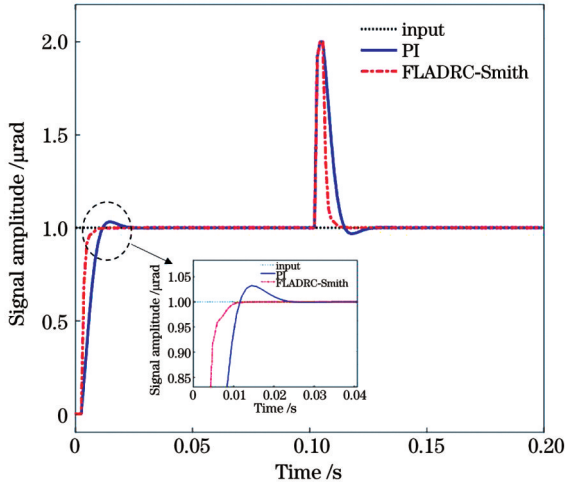


图7 FLADRC-Smith控制和PI控制下系统的响应性能与抗扰能力
Fig. 7 Response performance and disturbance rejection ability of system using FLADRC-Smith control and PI control

Smith与FLADRC-Smith控制下系统具备同等带宽, 设定跟踪定值 $1 \mu\text{rad}$, 进一步对比 TTM 的响应性能和系统的抗扰能力。假定闭环过程中 AO 模型在时域的摄动范围为 $(0, 0.008 \text{ s}]$, 为兼顾 PI-Smith 控制器的带宽、动态响应性能以及抗高频扰动信号能力, 选用 PI 控制器参数 $K_p = 0, K_i = 181$, 此时 PI-Smith 控制下系统的误差抑制带宽为 29.1 Hz 。

根据前节分析, AO 倾斜校正系统中闭环传递函数与误差抑制函数具有相同的极点成分, FLADRC-Smith 控制下系统误差抑制带宽约为 $\mu\omega_0$, 结合 $\omega_c \approx$

$$\mu \frac{\omega_0}{k_p}, 0 < \mu < 1 \text{ 以及 } k_p > \frac{\omega_0}{\sqrt{3} \omega_c}, \text{ 可得}$$

$$0.557 < \mu < 1, \tag{15}$$

$$181 < \omega_0 < 313. \tag{16}$$

若 ω_0 选定 305 rad/s , 为使误差抑制带宽为 29.1 Hz , 则可选定 μ 值为 0.6 , 调整 k_p 为 35 , 使用该整定参数对比两种控制方法下 TTM 的响应性能。

图 8 比较了 PI-Smith 与 FLADRC-Smith 控制下 TTM 的响应性能和系统的抗扰能力。当 AO 模型中时间延迟未改变, 即 $\tau = \tau_1$ 时, 结果如图 8(a) 所示。可以看出 PI-Smith 与 FLADRC-Smith 控制下 TTM 响应速度快, 并且 TTM 的偏转角度输出量几乎保持一致, 在 0.04 s 时可达 $1 \mu\text{rad}$, 即两种控制方式下均可实现快速稳定跟踪。此外, 在闭环 0.2 s 时加入阶跃扰动, 可以看出两种控制方法都可以较快地抑制外部扰动。

当 τ 在闭环过程中摄动至设定最大值 0.008 s 时, $\tau \neq \tau_1$, 保持控制器参数不变, 结果如图 8(b) 所示。可以看出, PI-Smith 控制下 TTM 的峰值超调量为 50.79% , 响应达到并保持在输入抖动信号幅值 $\pm 5\%$ 内所需要的调节时间为 0.082 s , 而 FLADRC-Smith 控制下 TTM 的峰值超调量为 42.06% , 且调节时间仅为 0.0624 s 。以调节时间为动态响应性能指标, 可知 FLADRC-Smith 相比于 PI-Smith 将 TTM 动态响应性能提升了约 23.9% 。

图 8 说明, $\tau = \tau_1$ 时, 两种控制方法可使 TTM 具备快速的响应能力和较强的抗外扰能力, 但 $\tau \neq \tau_1$ 时, FLADRC-Smith 控制下系统抗内扰能力稍强于 PI-Smith。

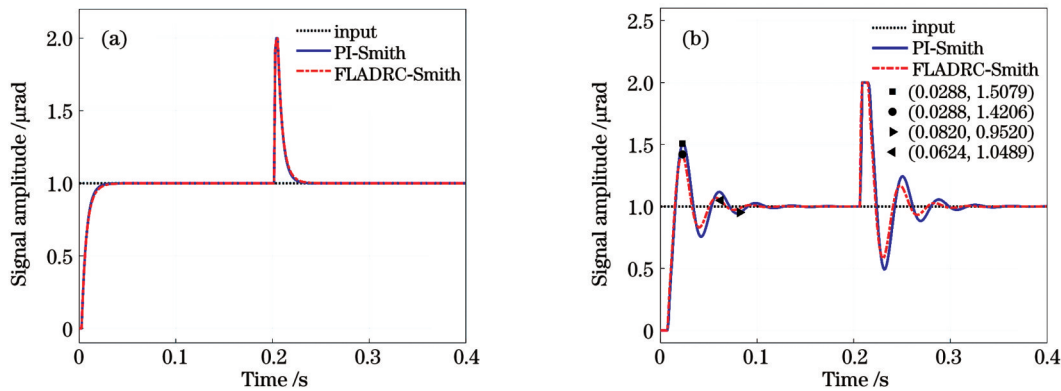


图8 FLADRC-Smith控制和PI-Smith控制下响应性能与抗扰能力对比。(a) $\tau = \tau_1$; (b) $\tau \neq \tau_1$
Fig. 8 Comparison of response performance and disturbance rejection ability between FLADRC-Smith control and PI-Smith control.
(a) $\tau = \tau_1$; (b) $\tau \neq \tau_1$

以上是基于理想倾斜镜展开的对比实验。在实际系统中, TTM 自身响应中存在谐振现象, 例如文献 [18] 研究的 TTM 被控模型为

$$K_0(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\delta\omega_n s + \omega_n^2} \tag{17}$$

该二阶振荡模型中 $\omega_n = 2\pi \cdot 300 \text{ rad/s}$, $\delta = 0.2$ 。

显然, 该 TTM 在 300 Hz 处有一谐振峰, 峰值在 8 dB 左右, 如图 9 中点划线所示。调整控制器参数, 使 PI-Smith 与 FLADRC-Smith 控制下系统具备同等带宽。其中 PI-Smith 控制器参数选取 $K_p = 0, K_i = 120$, FLADRC-Smith 控制器参数整定为 $\omega_0 = 250 \text{ rad/s}$, $\mu = 0.47, k_p = 16$, 此时两种控制方法下系统误差抑制

带宽约为 18.7 Hz。采用两种控制方法时系统误差传递函数的 Bode 响应如图 9 所示。从图 9 可以看出,在

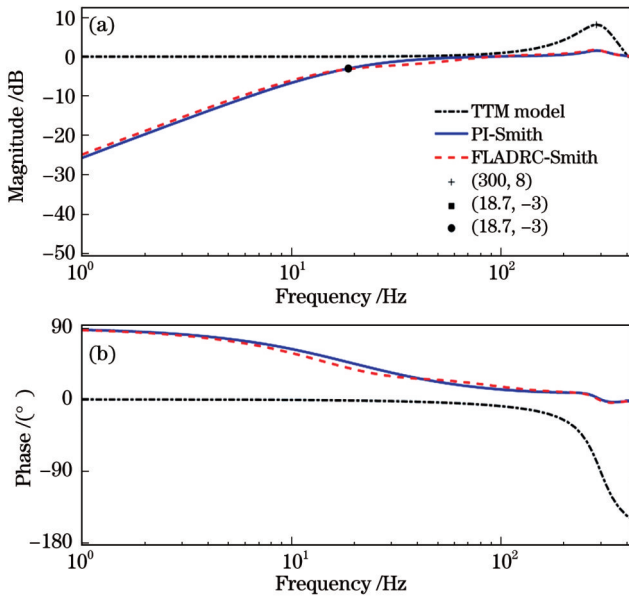


图 9 二阶振荡时滞系统中,FLADRC-Smith 控制和 PI-Smith 控制下系统频域特性比较。(a)幅频特性;(b)相频特性
Fig. 9 Comparison of system frequency domain characteristics using FLADRC-Smith control and PI-Smith control in second-order oscillatory time-delay system. (a) Magnitude-frequency characteristics; (b) phase-frequency characteristics

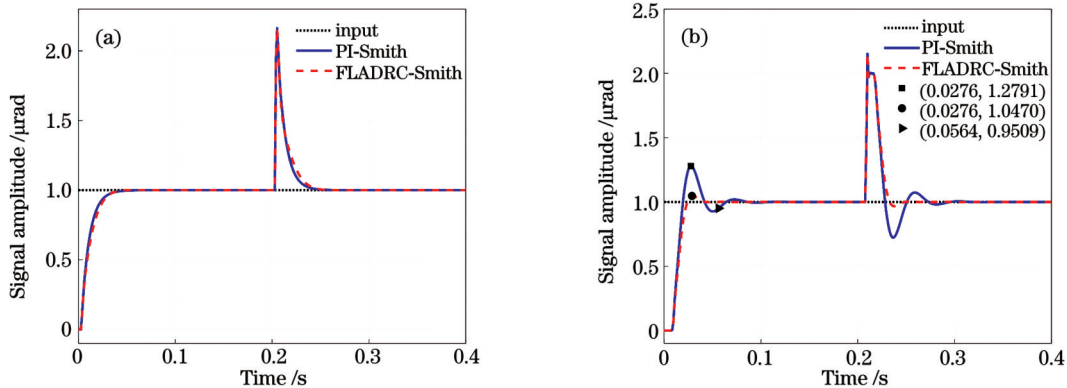


图 10 二阶振荡时滞系统中 FLADRC-Smith 控制和 PI-Smith 控制下 TTM 响应性能与抗扰能力对比。(a) $\tau = \tau_1$; (b) $\tau \neq \tau_1$
Fig. 10 Comparison of TTM response performance and disturbance rejection ability in second-order oscillatory time-delay system between FLADRC-Smith control and PI-Smith control. (a) $\tau = \tau_1$; (b) $\tau \neq \tau_1$

5 结 论

为实现 AO 系统中高带宽、高动态响应的 TTM 控制,本文提出了一种 FLADRC-Smith 控制方法。该方法利用 Smith 预估器提升系统误差抑制带宽,同时设计滤波环节保证系统对内部扰动与外部扰动的抑制能力。通过建立 AO 倾斜校正的仿真模型对该方法进行验证。结果表明,相比于 PI 控制,该控制方法能显著提升系统误差抑制带宽。此外,在同等误差抑制带宽条件下,在纯时滞系统与二阶振荡时滞系统中,相比于

小于 10 Hz 频段,两种控制方法误差抑制能力相近,而在 10~100 Hz 频段,FLADRC-Smith 控制方法稍优于 PI-Smith 控制方法。在 300 Hz 处,两种控制方法幅频特性均大于 0 dB,在该频率附近对扰动将有放大作用,说明两种控制方法在本质上均未能完全消除谐振峰,仅实现了在谐振情况下的 TTM 稳定控制。

进一步比较了二阶振荡时滞系统中 PI-Smith 与 FLADRC-Smith 控制下 TTM 的响应性能和系统的抗扰能力。当 AO 模型中时间延迟未改变,即 $\tau = \tau_1$ 时,设定跟踪定值 1 μrad ,结果如图 10(a) 所示。可以看出在两种控制方法下,TTM 响应速度快,可无超调跟踪定值信号。此外,在闭环 0.2 s 时加入阶跃扰动,由于谐振影响,在扰动作用的瞬间扰动幅值被放大,但两种控制方法都可快速将其抑制。

当 τ 在闭环过程中摄动至设定最大值 0.008 s 时, $\tau \neq \tau_1$,保持控制器参数不变,结果如图 10(b) 所示。可以看出,PI-Smith 控制下 TTM 的峰值超调量为 27.91%,响应达到并保持在输入抖动信号幅值 $\pm 5\%$ 内所需要的调节时间为 0.0564 s,而 FLADRC-Smith 控制下 TTM 的峰值超调量仅为 4.70%,响应未超出输入抖动信号幅值的 $\pm 5\%$,调节时间为 0,显著提高了 TTM 的动态响应性能。图 10 说明,在二阶振荡时滞系统中,FLADRC-Smith 控制方法可使 TTM 具备快速的响应能力与较强的抗内外部扰动能力。

PI-Smith 控制,FLADRC-Smith 控制提高了系统抗内外扰动的能力,TTM 动态响应性能提升超过 20%。在二阶振荡时滞系统中,本文所提方法未能完全抑制 TTM 的谐振峰,在后续工作中将适当改进 FLADRC-Smith 控制方法中的滤波环节抑制 TTM 谐振峰,进一步提升 TTM 控制性能。

参 考 文 献

[1] 凡木文, 黄林海, 李梅, 等. 抑制光束抖动的压电倾斜镜高带宽控制[J]. 物理学报, 2016, 65(2): 024209.
Fan M W, Huang L H, Li M, et al. High-bandwidth control of

- piezoelectric steering mirror for suppression of laser beam jitter[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(2): 024209.
- [2] 冉兵, 杨平, 文良华, 等. 大口径压电倾斜镜的反作用力分析及补偿研究[J]. *中国激光*, 2020, 47(6): 0601007.
Ran B, Yang P, Wen L H, et al. Analysis and compensation of reaction force in large-aperture piezoelectric fast steering mirror[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(6): 0601007.
- [3] Hedding L R. Fast steering mirror design and performance for stabilization and single axis scanning[J]. *Proceedings of SPIE*, 1990, 1304: 14-24.
- [4] 刘鑫, 李新阳, 杜睿. 压电倾斜镜迟滞非线性建模及逆补偿控制[J]. *光电工程*, 2020, 47(4): 180654.
Liu X, Li X Y, Du R. Modeling and inverse compensation control of hysteresis nonlinear characteristics of piezoelectric steering mirror[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(4): 180654.
- [5] 周子夜, 冯忠毅, 黄林海, 等. 紧凑型压电式高性能快反镜结构设计[J]. *中国激光*, 2021, 48(13): 1305002.
Zhou Z Y, Feng Z Y, Huang L H, et al. Structure design of compact piezoelectric fast steering mirror with high performance[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(13): 1305002.
- [6] 周睿, 张强, 廖勇, 等. 混合自适应滤波的光束抖动控制技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(13): 1314004.
Zhou R, Zhang Q, Liao Y, et al. Research on beam jitter control technology base on hybrid adaptive filter[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(13): 1314004.
- [7] 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.
Li X Y, Jiang W H. Effective bandwidth analysis of adaptive optics control system[J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, 17(12): 1697-1702.
- [8] 李锦英, 付承毓, 唐涛, 等. 运动平台上光电跟踪系统的自抗扰控制器设计[J]. *控制理论与应用*, 2012, 29(7): 955-958, 964.
Li J Y, Fu C Y, Tang T, et al. Design of active disturbance-rejection controller for photoelectric tracking system on moving bed[J]. *Control Theory & Applications*, 2012, 29(7): 955-958, 964.
- [9] Xiang W D, Yang P, Wang S, et al. Underwater image enhancement based on red channel weighted compensation and gamma correction model[J]. *Opto-Electronic Advances*, 2018, 1(10): 180024.
- [10] 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.
- [11] 阮勇, 徐田荣, 杨涛, 等. 具有延迟特性的倾斜镜系统中速度-位置控制方法[J]. *光电工程*, 2020, 47(12): 49-55.
Ruan Y, Xu T R, Yang T, et al. Position-rate control for the time delay control system of tip-tilt mirror[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(12): 49-55.
- [12] 马晶, 韩琦琦, 于思源, 等. 卫星平台振动对星间激光链路的影响和解决方案[J]. *激光技术*, 2005, 29(3): 228-232.
Ma J, Han Q Q, Yu S Y, et al. The effect of vibration on intersatellite optical communication and the resolving project[J]. *Laser Technology*, 2005, 29(3): 228-232.
- [13] Yang K J, Yang P, Wang S, et al. Tip-tilt disturbance model identification based on non-linear least squares fitting for linear quadratic Gaussian control[J]. *Optics Communications*, 2018, 415: 31-38.
- [14] Wang J Y, Guo Y M, Kong L, et al. Experimental demonstration of LQG control with disturbance mitigation on multiple modes in adaptive optics system[J]. *Optik*, 2020, 202: 163594.
- [15] 王佳英, 郭友明, 孔林, 等. 自适应光学系统的混合控制方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(23): 230101.
Wang J Y, Guo Y M, Kong L, et al. Hybrid control method for adaptive optics system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(23): 230101.
- [16] 李俊华, 董岩, 林本震, 等. 基于光通信快速反射镜的改进型自抗扰控制算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(7): 0706007.
Li J H, Dong Y, Lin B Z, et al. Improved active disturbance rejection control algorithm based on optical communication fast mirror[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(7): 0706007.
- [17] Zheng Q, Gao L Q, Gao Z Q. On validation of extended state observer through analysis and experimentation[J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2012, 134(2): 024505.
- [18] 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.
Luo Q, Li X Y. Design of optical axis jitter rejection controller for adaptive optics systems[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(4): 0432003.

Tip-Tilt Mirror Control Method Using Smith Predictor and Filter-Based Linear Active Disturbance Rejection

Kong Lingxi^{1,2,3,4}, Cheng Tao^{1,2**}, Su Chunxuan^{1,2}, Yang Kangjian^{1,2}, Zhao Mengmeng^{1,2,4}, Wang Shuai^{1,2}, Yang Ping^{1,2*}

¹Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, Sichuan, China;

²Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, Sichuan, China;

³School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

⁴University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract

Objective To provide precise tip-tilt correction, the tip-tilt mirror (TTM) control with high bandwidth and high dynamic response is crucial for adaptive optics (AO) systems. The time delay of the system, which is a significant factor restricting the error attenuation bandwidth of the system, is 2–3 times the sampling period. Additionally, the dynamic response performance of TTM will be decreased by the vibration of the experimental device, the unstable operating environment, and other factors brought on by external system disturbances, as well as the time-delay parameters of the system model brought on by internal troubles. While strategies such as the linear quadratic Gaussian (LQG) control method and hybrid control can suppress the high frequency jitter of the beam, and the Smith predictor control method can compensate for the time delay in the system. Nevertheless, the common problem with these

methods is that the control effectiveness depends on the accuracy of the model, which results in the inability to suppress disturbances. In order to achieve high bandwidth and high dynamic response TTM control in AO systems, a control method utilizing the Smith predictor and filter-based linear active disturbance rejection (FLADRC-Smith) is proposed to synchronously compensate for the effects of time delay and internal and external disturbances on the tip-tilt correction performance.

Methods In order to increase error attenuation bandwidth, the FLADRC-Smith control method employs a Smith predictor to modify the linear active disturbance rejection control (LADRC) method. The AO system is considered a pure time-delay system. Therefore, a filter is designed to modify the control amount of TTM in order to achieve LADRC that is resistant to high frequency disturbance. In this paper, characteristics of the error attenuation transfer function of the control system are analyzed from a frequency domain perspective, and the control system is optimized and made simpler. Meanwhile, the stability of the control system when the time-delay parameters of the system model are varied is ensured by parameter constraints, and the connection between the error attenuation bandwidth and the system performance in suppressing internal and external disturbances is analyzed. The formula for the error attenuation bandwidth is supplied in the analysis, along with a straightforward method for tuning the parameters.

Results and Discussions MATLAB/Simulink is used to establish the simulation model of AO tip-tilt correction to verify the effectiveness of the FLADRC-Smith control method. Firstly, it is confirmed that FLADRC-Smith can increase the error attenuation bandwidth of the system. The error attenuation bandwidth is 25 Hz with proportional-integral (PI) control and 114 Hz with FLADRC-Smith control, showing a 4.56 times improvement with FLADRC-Smith control, according to simulation results after properly setting the controller parameters (Fig. 6). Then, to verify the disturbance rejection ability of FLADRC-Smith control method, it is compared with the PI-Smith control method. The controller parameters are set properly so that both control methods result in the same system error attenuation bandwidth. When the Smith parameter and time-delay parameter of the system model are both set to 0.0025 s, both control strategies can quickly and stably track a constant value signal. However, when the time-delay parameter of the system model is mismatched to 0.008 s, the dynamic performance index is the transient time required to achieve and maintain the response of TTM at $\pm 5\%$ of the input signal amplitude. FLADRC-Smith control, compared with PI-Smith control, improves the dynamic response of TTM by 23.9% (Fig. 8). Finally, the FLADRC-Smith control method is compared with the PI-Smith control method in a second-order oscillatory time-delay system. The controller parameters are reasonably tuned so that the system error attenuation bandwidth is the same for both control methods (Fig. 9). Both control methods can track the constant value signal quickly and steadily when the Smith parameter and time-delay parameter of the system model are set to 0.0025 s. But when the time-delay parameter of the system model is mismatched to 0.008 s, the response transient time of TTM with PI-Smith control is 0.0564 s, while the FLADRC-Smith overshoot does not exceed $\pm 5\%$ of the input signal amplitude. It indicates that the required transient time is 0 when using the FLADRC-Smith control method, which significantly improves the dynamic response performance of TTM (Fig. 10).

Conclusions The FLADRC-Smith control method can improve the bandwidth and the dynamic response performance of TTM effectively. In a pure time-delay system, this method improves the error attenuation bandwidth by 4.56 times compared with PI control. Under the same error attenuation bandwidth condition, the method improves the dynamic response performance of TTM by more than 20% with stronger suppression of internal and external disturbances compared with the PI-Smith control method in a pure time-delay system and a second-order oscillatory time-delay system.

Key words adaptive optics; tip-tilt mirror; time-delay system; active disturbance rejection