

文章编号: 1001-3806(2014)05-0692-06

基于自动控制理论的自适应光学控制系统优化

曾明¹, 沈建新^{1*}, 钮赛赛², 梁春¹

(1. 南京航空航天大学 机电学院, 南京 210016; 2. 上海航天控制技术研究所, 上海 200233)

摘要: 为了满足自适应光学系统实时快速的工作要求, 将自动控制理论引入到自适应光学系统中, 在不改变系统硬件性能的基础上对系统的控制部分进行了研究。首先, 对自适应光学闭环控制系统进行分析, 将其模块化并建立相应的数学模型; 其次, 在自动控制理论基础上设计控制器和相应的控制算法, 并分析了控制器的性能; 最后, 将自动控制理论的控制方法与人眼波前像差校正相结合, 使控制算法应用到自适应光学系统波前像差的校正中。结果表明, 相对于传统的自适应光学系统控制方法(纯积分控制和比例-积分控制), Smith 预补偿控制使自适应光学控制系统具有较高的闭环带宽和较好的动态、稳态控制性能; 在模拟人眼波前像差迭代校正过程中, Smith 预补偿控制器校正残余像差的快速性最好; 在实际人眼动态像差校正中, Smith 预补偿控制校正的残余像差值达到最小, 有利于自适应光学控制系统优化。

关键词: 集成光学; 自适应光学; 纯积分控制; 比例-积分控制; Smith 预补偿控制; 波前校正

中图分类号: TP273; TP301 文献标志码: A doi: 10.7510/jgjs. issn. 1001-3806. 2014. 05. 025

Optimization of adaptive optical control system based on automatic control theory

ZENG Ming¹, SHEN Jianxin¹, NIU Saisai², LIANG Chun¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. Shanghai Institute of Spaceflight Control Technology, Shanghai 200233, China)

Abstract: In order to improve the working speed of adaptive optics as soon as possible, the algorithm of automatic control theory was applied for adaptive optical system without changing the characteristics of the hardware. After analyzing the close-loop control system of the adaptive optical system, the mathematical model of adaptive optical control was constructed. The controllers and the control algorithms were designed and their characteristics were discussed based on the automatic control theory. After combining the automatic control algorithms and human eye wave-front aberration correction, the control algorithm was applied to the aberration correction. The experiment result shows that the Smith estimating precompensation control has higher closed-loop bandwidth, better dynamic and steady state characteristics than proportion-integration (PI) control and integrator control. The result of the Smith estimating precompensation control has better speed in static aberration correction of the bogus mode eye and makes the root mean square least in the dynamic aberration correction of human eye. So the Smith estimating precompensation control can optimize the control system of adaptive optics.

Key words: integrated optics; adaptive optics; integrator control; proportion-integration control; Smith estimating precompensation control; wave-front aberration correction

引言

自适应光学闭环控制系统是由波前传感器、波前校正器和波前控制器 3 个主要部分组成的集数字与模拟信号、离散与连续信号为一体的反馈回路系统^[1], 其中波前控制部分是整个自适应光学系统的核心, 它通过对波前传感器的探测信号进行分析计算, 产生控制信号施加于变形镜上, 使变形镜镜面发生形变, 补偿不断变化的动态波前像差, 从而达到对

基金项目: 江苏省产学研联合创新资金资助项目 (BY2012009); 江苏省自然科学基金资助项目 (BK2012380); 南京航空航天大学基本科研业务费资助项目 (NS2014049)

作者简介: 曾明 (1988-), 男, 硕士研究生, 现主要从事自适应光学系统的研究。

* 通讯联系人。E-mail: cadatc@nuaa.edu.cn

收稿日期: 2013-09-05; 收到修改稿日期: 2013-10-09

入射畸变波前像差的共轭校正^[1-2]。在整个校正过程中,由于波前像差是动态不断变化的,因此,在自适应光学系统中,控制部分的稳定快速性能要求较高。

近年来,随着自适应光学技术广泛应用于民用领域,尤其是眼科医疗领域的人眼视网膜成像方面,这为早期的眼科疾病诊断提供了极大的辅助作用。但由于自适应光学系统本身存在延迟环节,使波前传感器探测的信号不能及时得到准确反映,变形镜信号也得不到及时响应,从而使整个系统产生超调和震荡现象,影响系统的稳定性,最终影响人眼像差校正和成像。为了提高自适应光学系统控制性能,国内外研究者对此作了相关的研究并提出了很多比较经典的控制方法:如 DEMERLE 的比例-积分-微分(proportion-integration-differentiation, PID)控制法通过调整控制参量提高系统的控制带宽和稳定性^[3]; DESSENNE 提出了一种自适应控制算法来解决系统控制问题^[4-5]。上述方法都采用简单的纯积分控制方法,称为基于静态的解耦式纯积分控制法^[6-7]。YAN 等人在理论上提出一种自适应光学闭环系统预测控制算法^[8],并用于天文观测领域的自适应光学系统。随着高帧频相机的发展和系统采样频率的增大,由纯积分控制给系统带来的延迟明显低于系统的稳定裕度,因此自适应光学系统需寻求更好可行的控制方法。基于此,本文中将 Smith 预补偿控制法引入到自适应光学系统中来消除控制系统的延时环节,在不改变系统硬件性能的基础上,通过与波前校正算法相结合来提高像差的校正效果。通过仿真实验发现,Smith 预补偿控制器校正算法有较好的动态响应特性,对模拟眼和实际人眼动态像差的校正结果表明,Smith 预补偿控制器的系统快速性较好,有利于人眼动态像差校正。

1 自适应光学控制系统模型

1.1 自适应光学系统模型

自适应光学闭环控制人眼像差校正系统工作原理示意图如图 1 所示,波长为 785nm 的激光点光源经过分光镜(beam splitter, BS)反射进入眼底,从眼底反射出的波前经过 BS,再由变形镜反射到达波前传感器,PC 机根据波前传感器的波前信息分析计算,通过数模转换器和高压放大器,将控制信号施加于变形镜电极,驱动变形镜对像差校正,波前传感器继续探测残余像差信息,反馈给控制系统,从而实现

对人眼像差的循环校正。

由图 1 可知,人眼像差校正闭环控制系统主要由波前探测、波前计算、控制计算、数模转换、高压放大和变形镜响应 6 个环节组成,其系统控制方框图如图 2 所示。

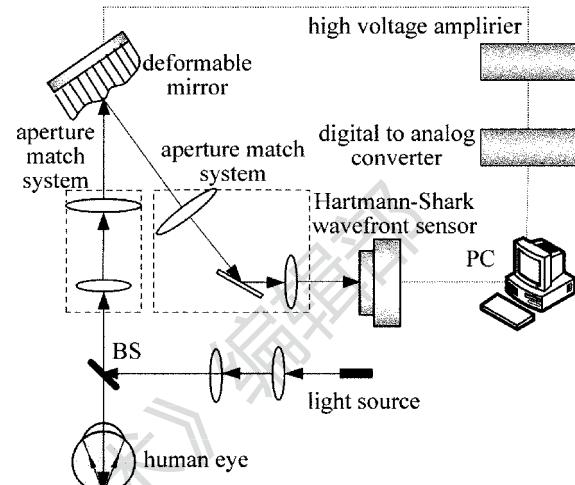


Fig. 1 Schematic of human eye aberration correction system

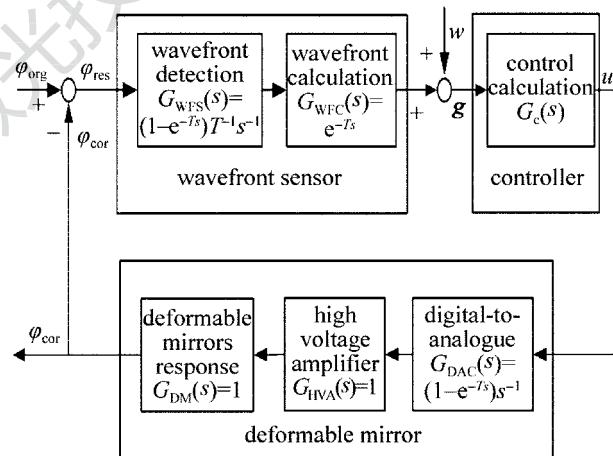


Fig. 2 Block diagram of adaptive optics closed-loop correction system

图 2 中, φ_{org} , φ_{cor} , φ_{res} 分别为同一瞳孔面上随时间变化的原始畸变波前、校正波前、校正后残余波前, w 为波前测量的噪声误差, u 为控制电压, g 为波前探测的斜率值向量。 $G_{\text{WFS}}(s)$ 为波前探测传递函数, 输入与输出均为连续信号, 其时间特性取决于波前传感器 CCD 曝光时间 T , 本文中取 $T = 0.01\text{s}$ 。 $G_{\text{WFC}}(s)$ 为波前计算传递函数, 主要是对波前传感器探测信号进行分析计算, 其输入为连续信号, 输出为离散信号。由于它在自适应光学系统中占据了大部分计算时间, 再加上传感器的延迟, 因此该环节可视为纯延迟时间 τ 的环节。与波前传感器曝光时间相比, τ 与 T 近似相等, 本文中取 $\tau = T$ 。

控制器模块的传递函数为 $G_c(s)$, 主要任务是

根据重构出的波前信息计算出变形镜的控制信号,进行实时补偿从而优化整个自适应光学系统的闭环响应特性,其运算的延迟时间 τ 相对于曝光时间 T 可以忽略不计。

变形镜模块包含了数模转换、高压放大和变形镜响应 3 个环节。数模转换的时间特性可看作零阶保持器,其传递函数为 $G_{DAC}(s)$ 在自适应光学连续系统模型研究中通常忽略数模转换的 0 阶保持作用,将其传递函数置为 1。高压放大和变形镜响应在工作时由于自身频率一般在几千赫兹以上,远远高于自适应光学控制系统的控制带宽,所以将其传递函数置为 1,其输入与输出均为连续信号。

由上述分析可知,自适应光学控制系统包含有连续信号和离散信号,因此可以采用基于连续系统模型和基于采样系统模型对闭环控制系统进行研究,两者最终目标都是确定最优化控制器和相应控制算法。本文中只对连续系统模型进行重点研究,则 $G_{DAC}(s) = 1$ 。

由图 1 可知,自适应光学系统的开环和闭环传递函数为:

$$G_{open}(s) = (1 - e^{-Ts}) e^{-Ts} \frac{G_c(s)}{Ts} \quad (1)$$

$$G_{close}(s) = G(s) / [1 + G(s)] = (1 - e^{-Ts}) e^{-Ts} G_c(s) / [Ts + (1 - e^{-Ts}) e^{-Ts} G_c(s)] \quad (2)$$

由(1)式、(2)式可知,控制器 $G_c(s)$ 影响着整个自适应光学系统,设计合理的控制器可使自适应光学闭环控制系统性能达到最优。控制器的选择设计需满足:在频域内,开环系统幅值裕量大于 6dB、相位裕量在 $30^\circ \sim 70^\circ$ 内;闭环系统谐振峰值不超过 3dB^[9]。

由于自适应光学闭环控制系统是具有延迟效应的系统,系统闭环传递函数中的延迟环节 e^{-Ts} 会导致系统信号不能很好地反馈到系统的控制计算环节 $G_c(s)$ 中,这严重约束了自适应光学系统的控制带宽和控制的稳定性。在经典控制理论中常采用 PID 控制法来解决延迟效应,其传递函数为:

$$G_{PID}(s) = K_p + K_i/s + K_d s \quad (3)$$

式中, K_p, K_i, K_d 为比例、积分、微分增益参量。其相应自适应光学开环传递函数为:

$$G_{open,PID}(s) = (K_p + K_i/s + K_d s) \times (1 - e^{-Ts}) e^{-Ts} / s \quad (4)$$

对(4)式基于频域特性分析,令 $s = j\omega, \omega$ 代表

频率,由于控制系统的分析主要是在中低频段内,近似满足 $\sin(\omega T/2) = \omega T/2$,则(4)式可变为:

$$G_{open,PID}(s) = (K_p s + K_i + K_d s^2) e^{-3Ts/2} / s \quad (5)$$

对应的相频特性表达式为:

$$\varphi_{open,PID}(j\omega) = -\frac{\pi}{2} - \frac{3\omega T}{2} + \arctan[K_p(K_i/\omega - K_d\omega)] \quad (6)$$

由(6)式可知,在中低频段内, $K_d\omega$ 对系统相位裕量的提高并没有显著作用,故通常不考虑微分环节,主要分析纯积分控制和比例-积分(proportion-integration, PI)控制环节。对于纯积分环节,其传递函数为:

$$G_i(s) = \frac{K_i}{s} \quad (7)$$

在自适应光学闭环控制连续系统模型中,纯积分控制器的开环传递函数、闭环传递函数为:

$$G_{i,open}(s) = K_i (1 - e^{-Ts}) \frac{e^{-Ts}}{Ts^2} = K_i e^{-3Ts/2} / s \quad (8)$$

$$G_{i,close}(s) = G_{i,open}(s) / [1 + G_{i,open}(s)] = K_i e^{-3Ts/2} / (s + K_i e^{-3Ts/2}) \quad (9)$$

对于(8)式、(9)式的纯积分控制器传递函数,系统稳定时, $23 \leq K_i \leq 55$ 。

PI 控制器通过引入比例控制作用来改善纯积分控制对系统稳定性和动态过程所带来的影响,即改善系统的相位裕量,其传递函数为:

$$G_{PI}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (10)$$

在自适应光学闭环控制连续系统模型中,PI 控制器的开环传递函数、闭环传递函数为:

$$G_{PI,open}(s) = (1 - e^{-Ts}) e^{-Ts} (K_p + K_i/s) / (Ts) = (K_i + K_p s) e^{-3Ts/2} / s \quad (11)$$

$$G_{PI,close}(s) = G_{PI,open}(s) / [1 + G_{PI,open}(s)] = e^{-3Ts/2} (K_p s + K_i) / [s + e^{-3Ts/2} (K_p s + K_i)] \quad (12)$$

由(8)式、(9)式和(11)式、(12)式可知,纯积分控制系统受增益参量 K_i 约束严重,PI 控制参量选取比较复杂,而且在开环、闭环传递函数(8)式、(9)式中延迟环节 e^{-Ts} 依然存在,则说明 PID 控制没有彻底地消除延迟环节。在此基础上引进 Smith 预补

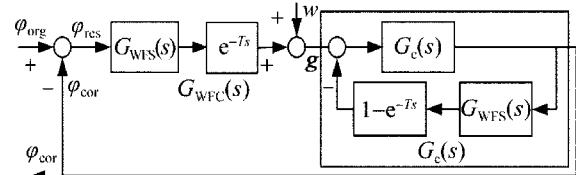


Fig. 3 Block diagram of Smith estimating precompensation control system

偿控制^[10],通过预补偿环节来消除传递函数中的延迟环节,从而提高系统的控制性能。基于 Smith 预补偿控制的自适应光学系统框图如图 3 所示,其基本原理是与控制器并联一个补偿环节。

Smith 预补偿控制器的传递函数为:

$$G_c(s) = K_s Ts / [Ts^2 + K_s(1 - e^{-Ts})^2] \quad (13)$$

式中, K_s 为 Smith 预补偿控制器的控制参量。在自适应光学闭环控制连续系统模型中,其对应的开环和闭环传递函数为:

$$G_{c,open}(s) = K_s(1 - e^{-Ts})e^{-Ts} / [Ts^2 + K_s(1 - e^{-Ts})^2] = K_s e^{-3Ts/2} (s + TK_s e^{-Ts}) \quad (14)$$

$$G_{c,close}(s) = G_{c,open}(s) / [1 + G_{c,open}(s)] = K_s e^{-3Ts/2} / (s + K_s e^{-Ts/2}) \quad (15)$$

1.2 控制器性能分析

基于上述控制器对应的传递函数,在闭环带宽一致的基础上对不同控制器的谐振峰值、相位裕量、幅值裕量、输入信号作用下的单位阶跃响应等性能进行分析。由于人眼像差波动频率主要在 8Hz ~ 9Hz,故控制理论上的闭环带宽至少大于 16Hz。取纯积分控制器参量 $K_p = 52$, PI 控制器中 $K_p = 50$, $K_i = 0.1$, Smith 预补偿控制中 $K_s = 72.5$, 此时闭环带宽都为 18.7Hz。

图 4 为各种控制器下闭环传递函数频域特性

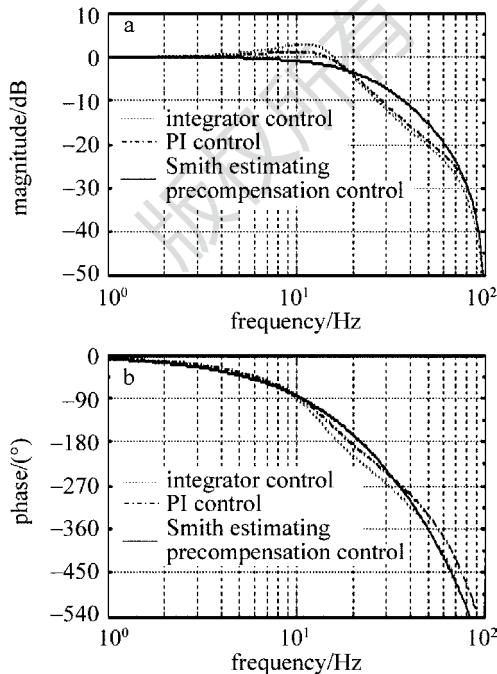


Fig. 4 Bode diagram of close-loop transfer function with different controllers

Bode 图,从图中可以看出,在低频段 3 种控制器的特性没有太大的差异;在中频段,纯积分和 PI 控制器的谐振峰值为 0dB ~ 3dB 内,满足系统稳定性要求。Smith 预补偿控制器的系统不产生谐振峰值,表明系统的稳定性最好,在自适应光学系统中表现为系统快速性较好。在高频段,Smith 预补偿控制器相对于其它两种控制器有较小的抑制作用,即在自适应光学系统中能够补偿更多的高频像差。

图 5 为各种控制器下连续系统误差传递函数频域特性 Bode 图,从图中可以看出,在传递函数增益为 0dB 时,纯积分控制器、PI 控制器和 Smith 预补偿控制器的频率依次增大,即 Smith 预补偿控制器系统的误差抑制带宽比较大,则系统能跟踪误差信号的频率范围也越大,在自适应光学闭环控制系统中,表现为能够更多地抑制人眼像差中的低频成分。

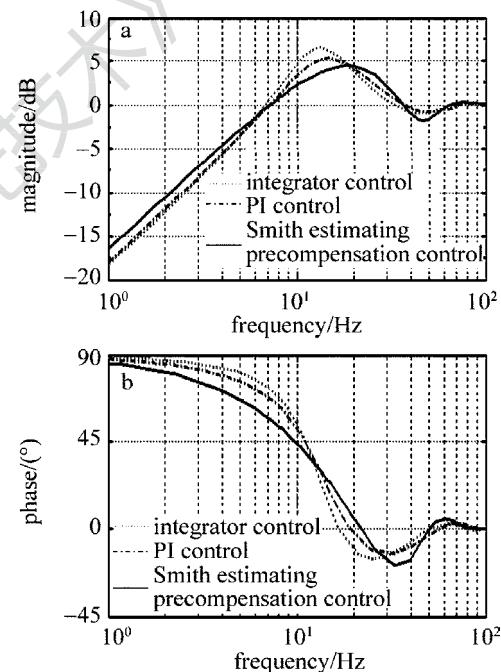


Fig. 5 Bode diagram of error transfer function with different controllers

表 1 为各种控制器在系统输入信号作用时的单位阶跃响应动态性能对比。从表中可以看出,3 种控制器的延迟时间、上升时间和峰值时间相差不大,但 Smith 预补偿控制器的调节时间和超调量远远低于纯积分和 PI 控制器,表明 Smith 预补偿控制系统有较快的响应速度,在自适应光学控制系统中表现为系统响应的实时快速性较高。

由上述特性分析知,Smith 预补偿控制可以很好地优化系统的闭环带宽,减小延迟对闭环输出的影响,相对于其它两种控制器,Smith 预补偿控制器使系统具有更高的闭环带宽、更好的动态、稳态性能,

Table 1 The dynamic character of time response under different controllers

controller	the dynamic character of controllers				
	delay time/s	rise time/s	peak time/s	setting time/s	overshoot/%
integrator control	0.0246	0.0167	0.0507	0.1018	26.8269
PI control	0.0231	0.0176	0.0487	0.0668	15.7861
Smith estimating precompensation control	0.0226	0.0187	0.0589	0.0378	0.1021

适用于对自适应光学系统进行优化控制。

2 自适应光学系统波前像差校正控制算法

在自适应光学闭环控制系统波前像差校正中通常采用基于奇异值分解的算法^[11-12],其像差校正迭代公式为:

$$u(s)_{k+1} = u(s)_k - \mu e(s)_{k+1} \quad (16)$$

式中, $u(s)$ 为电压信号, $e(s)$ 为校正残余像差的控制信号, μ 为校正步长。

自适应光学系统中,控制器的输入信号为由波前传感器探测到的校正后残余像差信号,记为 $e(s)$,由控制器分析计算施加在变形镜电极上的控制电压信号为 $u(s)$ 。则对于纯积分控制器:

$$\frac{u(s)}{e(s)} = \frac{K_i}{s} \quad (17)$$

对(17)式进行 z 变换可得:

$$u(z) = z^{-1}u(z) + TK_i e(z) \quad (18)$$

将(16)式、(18)式与变形镜拟合 Zernike 模式像差的电压信号求解模型相结合^[11],可得纯积分控制下的波前像差校正算法递推公式:

$$u_{i,k} = u_{i,k-1} + TK_i e_{i,k} = u_{i,k-1} - TK_i \mathbf{M}^+ C_{i,k} \quad (19)$$

式中, \mathbf{M}^+ 为变形镜影响函数奇异值分解得到的广义逆矩阵, $C_{i,k}$ 为第 $(k-1)$ 次校正后残余像差模式系数,则 TK_i 即为像差校正的步长 μ 。

依据上述求解方法可得,PI 控制器和 Smith 预补偿控制器下的波前校正递推公式分别为:

$$u_{\text{PI},k} = u_{\text{PI},k-1} + K_p \mathbf{M}^+ C_{\text{PI},k-1} - (K_p + TK_i) \mathbf{M}^+ C_{\text{PI},k} \quad (20)$$

$$u_{\text{S},k} = TK_S u_{\text{S},k-2} + (1 - TK_S) u_{\text{S},k-1} - TK_S \mathbf{M}^+ C_{\text{S},k} \quad (21)$$

3 仿真实验与结果分析

通过上述分析知 Smith 预补偿控制器相对于其它两种控制器性能较优,将各种控制器下像差校正算法的递推公式应用到自适应光学像差校正中,控

制器的参量与上述闭环带宽相同时的参量一致,通过仿真实验对 Thibos 模拟人眼静态像差进行校正,像差初始均方根 (root mean square, RMS) 值为 0.91λ ,为了模拟像差校正过程中实际情况,在每次像差校正中加入正态分布满足 $N(0, 0.005)$ 的高斯白噪声。将上述控制器算法在 OKO37 单元微机械薄膜变形镜上进行仿真实验,变形镜迭代校正后残余像差 RMS 值变化如图 6 所示。

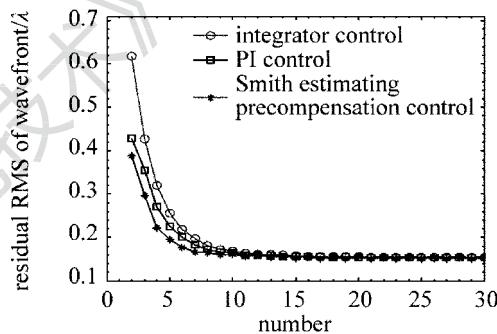


Fig. 6 Static aberration correction of Thibos mode eye with different controllers

从图 6 中可以看出,3 种控制器均能将残余像差校正至一个稳定的值,但在 Smith 预补偿校正算法下,残余像差 RMS 值减小得最快,其次是 PI 控制算法下,纯积分控制下最慢,表明 Smith 预补偿控制的快速性较好,有利于自适应光学像差快速性校正。

将上述参量配置的波前校正算法应用在自适应光学成像系统上对实际人眼动态像差进行校正,此时纯积分、PI 控制和 Smith 预补偿控制对应的自适应光学系统闭环带宽分别为 12.3dB, 13.9dB 和 15.8dB, 变形镜迭代校正后的残余像差 RMS 值的变化如图 7 所示。

从图 7 中可以看出,在 3 种控制算法下均能将人眼像差校正到一个稳定的值,这与 3 种控制算法下 Thibos 模拟人眼静态像差校正结果相同,而且 Smith 预补偿控制下系统的快速性最好。对于模拟眼静态像差,3 种校正算法性能近似一致,差别较小;对于实际人眼动态像差,Smith 预补偿控制校正后的残余像差可以达到最小,这是由于 Smith 预补

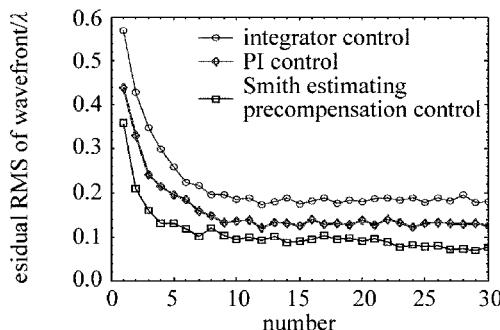


Fig. 7 Dynamic aberration correction of human eye with different controllers

偿控制下系统带宽最大,从而有效地校正了人眼像差中频率波动较大的像差。

4 结 论

为满足自适应光学控制系统实时性和快速性的工作要求,对自适应光学闭环控制系统进行研究。将自适应光学系统整体模型化,并在自适应光学连续系统模型下对纯积分控制器、PI控制器、Smith 预补偿控制器性能进行分析对比,通过比较发现,相对于其它两种控制器,Smith 预补偿控制器性能较优。将不同控制器的控制算法与自适应光学像差迭代校正过程相结合,对模拟眼的静态像差和实际人眼的动态像差进行校正,结果表明:在模拟眼静态像差校正中,纯积分控制、PI 控制、Smith 预补偿控制均能将像差校正到一个稳定的值,Smith 预补偿控制校正较快;在动态人眼像差的校正过程中,Smith 预补偿控制不仅校正快速性好,而且校正得到的残余像差最小,满足自适应光学控制系统工作要求。

参 考 文 献

- [1] TYSON R. Principles of adaptive optics [M]. Boca Raton, State of Florida, USA : CRC Press Inc, 2010:177-180.
- [2] JIANG W H. Adaptive optical technology [J]. Chinese Journal of Nature, 2006, 28(1):7-13 (in Chinese).
- [3] DEMERLE M, MADEC P Y, ROUSSET G. Servo-loop analysis for adaptive optics [C]//Adaptive Optics for Astronomy. Boston, Massachusetts, USA: Kluwer Academic, 1994:73.
- [4] DESSENNE C, MADEC P Y, ROUSSET G. Optimization of a predictive controller for closed-loop adaptive optics [J]. Applied Optics, 1998, 37(21): 4623-4633.
- [5] DESSENNE C, MADEC P Y, ROUSSET G. Modal prediction for closed-loop adaptive optics [J]. Optics Letters, 1997, 22 (20): 1535-1537.
- [6] CORREIA C, RAYNAUD H F, KULCSÁR C, et al. Minimum-variance control for astronomical adaptive optics with resonant deformable mirrors [J]. European Journal of Control, 2011, 17(3): 222-236.
- [7] YANG X X, WANG J L, MENG H R. Control algorithm design and simulation for adaptive optics system [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2012, 10(2): 25-31 (in Chinese).
- [8] YAN Zh J, LI X Y, RAO Ch H. Numerical simulation of a prediction control algorithm for close-loop adaptive optical system [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(1): 23-31 (in Chinese).
- [9] HU Sh S. Automatic control theory [M]. Beijing: Science Press, 2007:197-207 (in Chinese).
- [10] SMITH O J M. A controller to overcome dead time [J]. Instrumentation Systems Automatic Journal, 1959, 6(2): 28-33.
- [11] NIU S S, SHEN J X, LIANG Ch, et al. Comparative study on the performance of deformable mirror of NIR based human eye aberration correction system [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(7): 1795-1800 (in Chinese).
- [12] NIU S, SHEN J, LIANG C, et al. High-resolution retinal imaging with micro adaptive optics system [J]. Applied Optics, 2011, 50(22): 4365-4375.