

稳健控制在自适应光学系统中的应用

宋定安^{1,2,3,4} 李新阳^{1,3} 彭真明²

¹中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209

²电子科技大学光电信息学院, 四川 成都 610209

³中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209

⁴中国科学院大学, 北京 100049

摘要 利用稳健控制理论优秀的处理控制系统不确定性扰动问题的能力,将稳健控制方法应用于自适应光学系统中控制器的设计是自适应光学领域一个新的发展方向,国外已开展了大量研究工作,国内相关研究还处于起步阶段。为更好地促进稳健控制在自适应光学中的研究与应用,对现有的研究成果进行了梳理和回顾。简单介绍了稳健控制的基本概念和实质,概述了国内外对自适应光学系统中稳健控制的研究和应用发展现状。总结了现有研究成果,讨论了自适应光学系统中常用的几种稳健控制方法以及常见的几个基本问题,并对未来稳健控制在自适应光学中的发展和研究进行了预测和展望。

关键词 大气光学;自适应光学系统;稳健控制; H_∞ 控制; μ 分析

中图分类号 O439; TP273.2 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.060001

Application of Robust Control to Adaptive Optics Systems: A Summary and Review

Song Ding'an^{1,2,3,4} Li Xinyang^{1,3} Peng Zhenming²

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

²School of Optoelectronics Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610209, China

³Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

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

Abstract In virtue of its excellent capability of managing uncertainty systems, robust control is applied to the adaptive optics system controller design, marking a new stage of development. While researchers overseas have done a lot of work, researchers in China are still at the threshold of this field. Existed theses are reviewed to promote research in this regard. It firstly introduces the concept and essence of robust control and sketches the outlines of robust control research at home and abroad in adaptive optics system. It then summarizes the previous research results and discusses several robust control methods in adaptive optics as well as major problems encountered. At last, future perspectives of the robust control used in adaptive optics system are discussed.

Key words atmospheric optics; adaptive optics system; robust control; H_∞ control; μ -synthesis

OCIS codes 010.1080; 110.1080; 010.1285

1 引言

为解决天文观测中大气湍流的扰动问题, Babcock 于 1953 年首先提出自适应光学(AO)的基本概念^[1]。

收稿日期: 2016-01-06; 收到修改稿日期: 2016-02-24; 网络出版日期: 2016-05-16

基金项目: 国家自然科学基金(61205069, 61571096)

作者简介: 宋定安(1989—), 男, 博士研究生, 主要从事自适应光学控制技术等方面的研究。E-mail: psupgpv@163.com

导师简介: 李新阳(1971—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事自适应光学技术等方面的研究。

E-mail: xyli@ioe.ac.cn(通信联系人)

自适应光学以光学波前为研究对象,通过对光学波前的实时探测、控制和校正,使光学系统自适应外界变化,以达到校正光学波前的目的。AO系统综合应用了多种现代高新技术,包括电子技术和计算机技术等,其中控制器的设计对系统性能具有重要的影响,一直受到相关研究人员的关注和重视。

目前,AO系统已经发展出多种控制方法,主要包括经典控制、最优控制、自适应控制和稳健控制等。早期AO系统主要采用经典比例-积分(PI)控制。因其结构简单,易于工程实现,且工作稳定,目前仍然是工程实践中最常用的控制器,但对于多输入多输出(MIMO)系统的参数调整比较困难。最优控制是一种现代控制方法,采用数学优化方法来获得控制器参数,并使其满足特定的性能指标,虽然可以取得更好的控制效果,但是不能约束系统的稳健性,对系统参数变化适应性较差,而且其简化和实用性也有待进一步研究。自适应控制的优点是可以利用系统较少的先验知识,在线学习并调整参数和结构,实时更新系统信息,适应系统模型的变化,使系统获得良好的动态校正能力,但其结构相对比较复杂,工程实现比较困难。稳健控制是通过优化一定的性能指标设计控制器,从本质上讲也是一种最优控制,在设计过程中,还需要考虑系统不确定性的影响,因此也具有良好的不确定性处理能力。虽然稳健控制器设计过程中所依据的数学理论复杂,但设计的控制器结构简单,易于工程实现,从而引起了自适应光学相关研究者的关注。目前AO系统中的稳健控制相关研究已经发展了十多年,本文通过总结回顾已发表的相关文献成果,对今后的研究进行梳理和展望。

2 稳健控制理论的概念和实质

稳健控制的思想最早萌芽于20世纪30年代,主要是为了解决系统在控制对象建模过程中带来的不确定性以及系统运行过程中受到的不确定性外界扰动问题,最初主要考虑系统的某一性能或品质对系统参数变化的灵敏度^[2],但由于算法的复杂性和当时的客观条件,并没有引起太多重视。1980年以后,工业需求以及控制理论进一步发展,使得系统的稳健性重新引起了学术界的重视,稳健控制理论获得了巨大的进步,学者们逐渐提出多种稳健分析和设计方法,主要有 H_∞ 控制方法、 μ 综合技术、二次镇定方法以及基于平衡实现原理、Kharitonov定理和棱边定理的方法等^[3],此外还有近十年发展起来的自适应稳健控制^[4]、稳健内模控制^[5]、神经网络稳健控制^[6]、模糊稳健控制^[7]等智能稳健控制方法。Zames^[8]于1981年提出的 H_∞ 控制和Doyle等^[9]于1982年提出的 μ 分析方法是稳健控制理论发展中最突出的标志性方法。

稳健控制采用不确定模型建模,主要有乘性不确定性模型和加性不确定性模型两种,二者可以相互转化。不确定性模型包括两个部分:1)对象的标称模型,即通过先验知识获得的近似线性模型;2)对象模型的不确定性集,主要包括建模时忽略的动态性能以及系统参数或结构可能的变化。

稳健性包括稳健稳定性、稳健渐近调节能力和稳健动态特性三个方面。稳健稳定性是指系统在稳定工作状态下对不确定性干扰的容忍能力,稳健渐近调节能力和稳健动态特性反映控制系统的稳健性能要求,是指在不确定性影响下仍然具有渐近调节能力,且动态性能基本不变。

稳健控制的实质是确定系统不确定性的变化范围,考虑在不确定性的变化范围内设计控制器,以不变应万变,保证系统的性能达到要求。考虑系统的最坏工作情况,并在最坏工作情况下设计保证系统具有稳健性的控制器,则在其他情况下也一定可以保证系统的稳健性。

3 AO系统中常用的稳健控制方法

AO系统由波前传感器、波前校正器和波前控制器三部分构成,波前传感器可以实时检测目标光的波前畸变情况,并通过波前校正器直接对波前相位进行调制从而完成对波前误差的补偿,波前控制器主要实现波前复原和控制器信号生成^[10]。AO系统中存在多种不确定性因素,例如,系统延时的不确定性,主要与系统硬件和信号处理方式有关;增益不确定性,主要与各单元驱动器的加工工艺相关;各单元间耦合效应也具有不确定性,主要与变形镜单元的位置与排布有关;还有系统噪声的不确定性等。经典控制算法难以处理系统的不确定性,而稳健控制具有优秀的处理系统不确定性的能力,使其在AO系统中有了发展应用的空间。

目前,国内外已经有部分学者开展了稳健控制在AO系统中的应用研究,并得到一些成果,如表1所示。

可以看出,国外研究开始较早,已经进行了十多年,而国内的研究才刚刚起步。表中大部分文献源自国外,共18篇,约占总数的81.82%,国内文献只有4篇,约占文献总数的18.18%。

表1 AO系统中稳健控制研究的文献成果

Table 1 References related to applications of robust control in adaptive optics system

Year	Author	Method	Contribution	Reference
1999	Denis <i>et al.</i>	Discrete H_∞ control	Decide a controller with H_∞ control in AO system	[11]
1999	Miller <i>et al.</i>	State observation-based H_∞ control	Give simulation and analysis of system performance	[12]
2004	Winters <i>et al.</i>	Mixed sensitivity H_∞ control	Give emulation results of computer model	[13]
2004	Frazier <i>et al.</i>	H_∞ control	Validate efficiency of H_∞ control with experimentation	[14-15]
2005	Piatrou <i>et al.</i>	Kalman filtering	Research system robustness of Kalman filtering	[16]
2008	Baudouin <i>et al.</i>	H_∞ state feedback control	Give emulation results of computer model	[17]
2009	Iqbal <i>et al.</i>	Discrete H_∞ control	Validate efficiency of discrete H_∞ control with experimentation	[18-19]
2009	Guesalaga <i>et al.</i>	H_∞ control	Add a second-order filter in weighting function	[20]
2011	Wu <i>et al.</i>	PID based on LMI (linear matrix inequation)	Optimize PID parameters of MIMO system with LMI	[21]
2011	Kim <i>et al.</i>	H_∞ control	Give singularity analysis of MIMO system	[22]
2011	Neichel <i>et al.</i>	H_∞ control	Restrain disturbance with different frequency simultaneity	[23]
2011	Agrawal <i>et al.</i>	H_∞ control	Introduce MIMO robust controller design	[24]
2012	Guesalaga <i>et al.</i>	Integrator, Kalman, H_∞ control	Compare results of three methods, and add a second-order filter in weighting function	[25]
2013	Mauch <i>et al.</i>	μ synthesis	Use μ synthesis to design controller	[26]
2013	Guesalaga <i>et al.</i>	H_2 control	Optimize system performance with H_2 norm	[27]
2013	Maimaiti <i>et al.</i>	Robust model matching (RMM)	Use RMM to design controller	[28]
2014	Folcher	H_∞ control	Add a saturation compensator in controller design	[29]
2014	Zhao <i>et al.</i>	Nonsmooth H_∞ control	Use reduced order H_∞ controller	[30]
2014	Zhao <i>et al.</i>	Mixed H_2/H_∞ control	Use mixed H_2/H_∞ control to design controller	[31-32]

如前文所述,目前已经提出的稳健控制方法有很多种,但在AO系统中研究的方法并不多,几种主要方法介绍如下。

3.1 H_∞ 控制方法

H_∞ 控制是AO系统中研究最早且成果最多的一种稳健控制方法。 H_∞ 控制方法以优化的外部输入到评价信号闭环传递函数的 H_∞ 范数为性能指标,记为 γ 。评价信号根据控制要求选定,可以选择误差信号、控制信号和系统输出等。性能指标 γ 反映系统的稳健稳定性, γ 值越小,系统的稳健稳定性越好。系统的动

态性能一般由灵敏度函数和补灵敏度函数的特性决定。将 H_∞ 控制应用于 AO 系统中, 首先采用稳健控制理论描述 AO 系统的控制问题, AO 系统的稳健控制一般结构如图 1 所示。

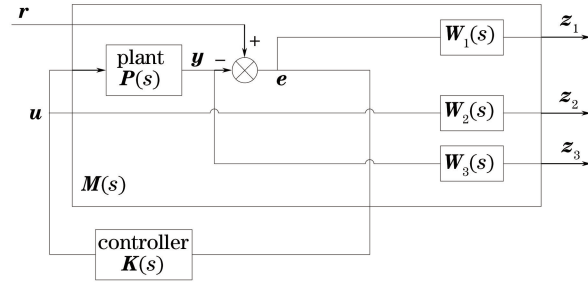


图 1 AO 系统中 H_∞ 控制结构框图

Fig. 1 Block diagram of H_∞ control in AO system

图 1 中 $P(s)$ 为系统的线性标称模型, $W_i(s)$, $i=1,2,3$ 为设计者选择的权函数, 用于系统回路的整形, $K(s)$ 为控制器, $M(s)$ 为系统的广义被控制对象。信号 r, u, y, e, z_i ($i=1,2,3$) 分别为外部输入信号、控制信号、系统输出信号、系统残差信号以及性能评价信号。根据稳健控制理论, H_∞ 控制问题即寻找一个真实有理的控制矩阵 K , 在 K 镇定 M 的情况下, 使得从 r 到 z 的闭环传递矩阵中 H_∞ 范数小于给定常数 $\gamma > 0$ ^[3]。

根据 H_∞ 控制理论, 系统的灵敏度传递函数、补灵敏度传递函数和控制灵敏度传递函数分别定义为

$$S(s) = e(s) / r(s) \quad (1)$$

$$S_c(s) = y(s) / r(s) \quad (2)$$

$$K(s)S(s) = u(s) / r(s) \quad (3)$$

则根据图 1 可得

$$z(s) = \begin{bmatrix} z_1(s) \\ z_2(s) \\ z_3(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_1(s)S(s) \\ W_2(s)K(s)S(s) \\ W_3(s)S_c(s) \end{bmatrix} r(s) = Q(s)r(s) \quad (4)$$

H_∞ 控制问题转变为对 $\|Q(s)\|_\infty$ 的约束问题。可以通过选择权函数 $W_1(s)$ 、 $W_2(s)$ 、 $W_3(s)$ 对灵敏度传递函数、补灵敏度传递函数和控制灵敏度传递函数整形, 使系统具有一定的稳健性并满足性能要求。

Denis 等^[11] 在 AO 系统中采用 H_∞ 控制方法设计控制器, 其性能指标 $\gamma = 0.563$, 灵敏度函数在 0 dB 下频率为 80 Hz, 闭环带宽约为 180 Hz。Winters 等^[13] 的仿真显示, 当系统参数发生变化时, 采用 PI 控制的系统可能工作不稳定, 而采用 H_∞ 控制仍能保证系统的稳定运行。Frazier 等^[14-15] 的实验结果表明, 采用 H_∞ 控制设计 AO 系统的控制器并没有损失系统的校正能力, 但是提高了系统稳定性。

3.2 混合 H_2/H_∞ 控制方法

混合 H_2/H_∞ 控制与 H_∞ 控制的基本思想类似, 区别在于混合 H_2/H_∞ 控制采用 H_2 范数约束系统的动态性能指标, 期望获得最优动态性能, 而稳健性能指标则通过 H_∞ 范数来约束, 保证系统的稳健稳定性^[33], 其他相关定义与 H_∞ 控制理论相同。混合 H_2/H_∞ 控制的结构框图如图 2 所示, 可得到外部输入信号 r 到评

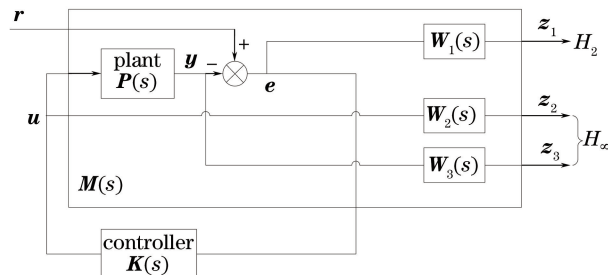


图 2 AO 系统混合 H_2/H_∞ 控制结构框图

Fig. 2 Block diagram of mixed H_2/H_∞ controller

价信号 z 的闭环传递矩阵为

$$z(s) = \begin{bmatrix} z_1(s) \\ z_2(s) \\ z_3(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_1(s)S(s) \\ W_2(s)K(s)S(s) \\ W_3(s)S_c(s) \end{bmatrix} r(s) = \begin{bmatrix} Q_1(s) \\ Q_2(s) \end{bmatrix} r(s). \quad (5)$$

求解控制器时,采用 H_2 范数约束 $\|Q_1(s)\|_2$ 的大小,追求最优动态性能,而 $\|Q_2(s)\|_\infty$ 采用 H_∞ 范数约束,保证 AO 系统的稳健稳定性,获得满足更高性能要求的 AO 系统。混合 H_2/H_∞ 控制基本理论和求解方法的详细介绍可以查阅参考文献[33]。

赵欣等^[31-32]采用 H_2 范数约束残差信号,以提升 AO 系统的校正补偿能力,而控制信号和输出信号则采用 H_∞ 范数约束,保证系统的稳定性。实验结果的稳健稳定性指标 $\gamma_r = 1.253$ 优于积分控制器 $\gamma_i = 1.259$,同时校正后波前整体倾斜的方差比积分控制提高了 2.959 倍,表明采用混合 H_2/H_∞ 控制方法设计控制器,可以提升 AO 系统的性能。

3.3 μ 分析方法

μ 分析方法是针对控制系统进行回路整形,通过求解系统的结构奇异值,设计系统的控制器。这种方法可以克服 H_∞ 控制方法在系统结构不确定性上的保守性,综合考虑系统的稳健稳定性和性能,设计满足较高系统要求的控制器^[3]。令 AO 系统从外部输入 r 到评价信号 z 的传递函数为 T_{zr} ,则其结构奇异值 $\mu_\Delta(T_{zr})$ 的定义为

$$\mu_\Delta(T_{zr}) = \frac{1}{\inf_{\Delta \in \underline{\Delta}} [\sigma_{\max}(\Delta) : \det(I - T_{zr}\Delta) = 0]}, \quad (6)$$

式中 $\sigma_{\max}(\Delta)$ 为不确定性的奇异值上界, Δ 为不确定性因素。 μ 分析方法的目標就是寻找一个控制器 $K(s)$,使 AO 系统的结构奇异值 μ 最小。

求解 μ 分析问题可以采用 D - K 迭代的方法^[34],即选择一个标度矩阵 D ,固定 D ,最小化 K ,转变为求解一个标准的 H_∞ 控制问题,然后固定 K ,最小化 D ,求解一个关于 D 的凸优化问题,依此循环,求取最优的 D 和 K 。

在 AO 系统中, μ 分析方法的研究还很不成熟,仅处于理论探索的初始阶段。Mauch 等^[26]利用 Pade 近似法将系统延时近似为线性模型,同时考虑了系统的增益和延时不确定性,采用 μ 分析方法设计控制器,采样频率为 905 Hz 时,相对于 PI 控制,消除干扰的时间缩短了 4~8 ms [20 ms (PI 控制), 12~16 ms (μ 分析)]。

3.4 其他稳健控制方法

其他稳健控制方法主要有:1) 买买提等^[28]提出的基于稳健模型匹配(RMM)方法的稳健补偿器,这种控制器阶数较小,结构简单,可以缩短 AO 系统实时计算时间并降低控制器的复杂性;2) Miller 等^[12]采用稳健观测器重构波前并设计 H_∞ 控制器,与比例-积分-微分(PID)控制相比,获得了系统全局稳定,并提高了系统动态校正能力。

4 AO 系统中稳健控制处理的几类问题

AO 系统是一种复杂系统,不同的 AO 系统存在不同问题。采用稳健控制技术设计 AO 系统的控制系统,首先是采用稳健控制理论来描述 AO 系统中存在的问题,进而选择相应方法进行控制器的设计。在目前已发表的文献中,稳健控制的研究主要集中在以下几个问题。

4.1 变形镜驱动器的迟滞非线性问题

迟滞非线性问题是一种十分常见的非线性现象,具有记忆特性、擦除特性和一致特性。在 AO 系统中,因为驱动器正负行程的差异,使执行器的正向运动与反向运动有所不同。采用稳健控制方法可有效处理系统的迟滞非线性问题,但是与 PI 控制器相比,会极大地增加控制器的阶数,影响其在工程实践中的应用。典型的驱动器迟滞非线性曲线如图 3 所示^[15]。为了追求高速和高精度,Frazier 等^[15]采用图 4 所示乘性不确定性模型对变形镜的迟滞非线性进行建模,模型的数学描述为

$$\Pi = P(I + W\Delta), \quad (7)$$

式中 \mathbf{P} 为系统的近似线性标称模型, \mathbf{I} 为单位矩阵, \mathbf{W} 为系统不确定性的权函数, Δ 为系统驱动器的迟滞非线性等不确定性因素。

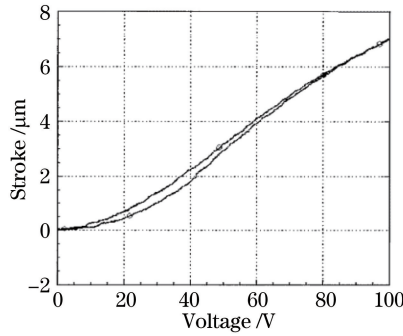


图3 驱动器迟滞非线性电压-行程驱动器曲线

Fig. 3 Voltage-stroke transfer function for a typical actuator

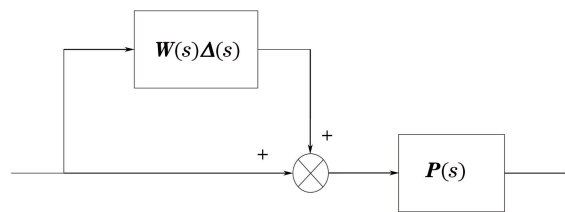


图4 乘性不确定性模型框图

Fig. 4 Block diagram representing multiplicative uncertainty

根据 H_∞ 控制理论, 系统的输入输出灵敏度函数和补灵敏度函数分别为

$$\mathbf{S} = (\mathbf{I} + \mathbf{P})^{-1}, \mathbf{T} = \mathbf{I} - \mathbf{S}. \quad (8)$$

将自适应光学系统中的迟滞非线性问题转变为采用乘性不确定性模型建模的 H_∞ 控制问题, 然后通过稳健控制工具箱, 求得满足要求的稳健控制器。赵欣等^[31-32] 同样采用乘性不确定性建模, 选择混合 H_2/H_∞ 控制方法设计控制器, 使 AO 系统的动态性能获得了进一步提高。

4.2 AO 系统的时间延迟非线性问题

延时非线性现象也是一种常见的非线性现象, 会影响系统的稳定性, 降低系统的动态校正能力。AO 系统的时间延迟来源主要为信号的处理与传递、哈特曼探测等。对于系统延时的处理, 存在几种不同的方式。

1) 如文献[11, 18-19], 采用离散化模型进行处理, 引入离散延时算子 z^{-d} , d 表示延时 d 个采样周期。将延时非线性表示为离散有理分式, 直接进行离散稳健控制器的设计, 该方法可以很好地应用于计算机控制系统中, 但不能处理系统的非周期延时问题。

2) 如文献[20, 25-26], 通过选择合适阶的有理分式线性近似系统的延时非线性, 即

$$\text{Ln}(-\tau s) \approx \frac{1 - k_1 s + k_2 s^2 + \dots + (-1)^n k_n s^n}{1 + k_1 s + k_2 s^2 + \dots + k_n s^n}, \quad (9)$$

式中 n 为线性近似的阶, k_i ($i=1, 2, \dots, n$) 为相关系数。采用(7)式所示不确定性模型对被忽略的非线性部分加以约束, 从而将 AO 系统的延时非线性问题转变为稳健控制问题, 然后针对近似线性模型设计稳健控制器。这种方法会增大系统模型的阶数, 增加控制实现的复杂度。

3) 如文献[28], 采用 Smith 预估器预先处理系统延时的影响, 再针对线性模型进行稳健补偿器的设计。

4.3 变形镜驱动器的饱和和非线性问题

AO 系统中执行器饱和问题的相关研究很少, 仅处于探索阶段, 原因为: 1) 饱和问题为一种非线性问题, 处理起来比较复杂; 2) 在工程中一般通过工艺设计提高驱动器的行程, 以避免工作时出现饱和, 但在实际工作中, 仍会存在驱动器饱和和非线性。Folcher 等^[29] 针对倾斜镜执行机构的饱和和非线性问题, 采用图 5 所示控制结构, 增加了饱和补偿器的设计, 抑制驱动器饱和作用。

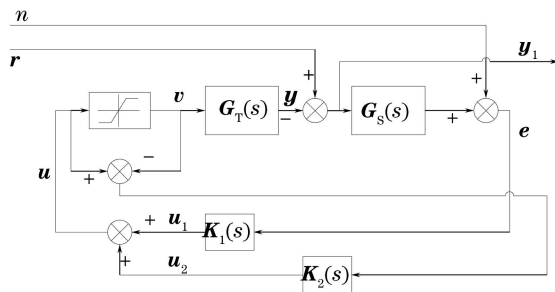


图5 饱和补偿器控制框图

Fig. 5 Anti-windup control scheme

图中 $G_T(s)$ 和 $G_S(s)$ 分别为倾斜镜和探测器的传递函数, $K_1(s)$ 为 H_∞ 控制器, $K_2(s)$ 为饱和补偿器。当执行器不饱和时, $K_2(s)$ 控制器输入为零, 不发生作用, 系统中只有 $K_1(s)$ 控制器工作; 当饱和发生时, $K_2(s)$ 补偿器发生作用, 消除执行器饱和的影响, 与 $K_1(s)$ 控制器一起工作, 提升系统的工作性能, 实现饱和抑制功能。

4.4 AO 系统的抖动干扰抑制问题

AO 系统中抖动干扰信号有多种来源, 包括外部空气流动对天文望远镜的影响和激光器本身固有的谐振频率等。 H_∞ 控制理论通过调整灵敏度权函数等对系统进行回路整形, 使控制系统性能满足要求。处理抖动问题时, 在灵敏度权函数中增加双二阶滤波器环节, 使系统对抖动频率扰动进行陷波滤波。 H_∞ 控制灵敏度权函数的一般形式为

$$W_c(s) = \frac{k_c}{T_c s + 1}, \quad (10)$$

式中 K_c 、 T_c 和 s 分别为一阶惯性环节的增益常数、时间常数和复算子变量。

在文献[20, 23, 25, 27]中, 为抑制抖动干扰, 灵敏度权函数的形式为

$$W_r(s) = \frac{k_r}{T_r s + 1} \cdot \frac{s^2 + 2\eta_1 \omega_0 s + \omega_0^2}{s^2 + 2\eta_2 \omega_0 s + \omega_0^2}, \quad (11)$$

式中 ω_0 值确定了需要被抑制的干扰频率, η_1/η_2 的大小决定于干扰频率处的干扰衰减, 通过调整 ω_0 和 η_1/η_2 , 可以实现抖动频率处的干扰抑制, 但是在权函数中增加双二阶滤波器, 会增加控制器的阶数, 使 AO 系统更为复杂, 因此在实际工程应用中需要加以考虑。

5 结束语

通过总结 AO 系统中稳健控制的研究成果, 介绍了 AO 系统中常用的几种稳健控制方法以及研究中存在的主要问题。稳健控制的数学工具比经典控制复杂得多, 所设计的控制器结构也比经典控制复杂。不同的控制器结构原理不同, 经典控制基于系统误差设计控制器, 在设计过程中, 只需要调整控制器的几个参数即可获得良好的性能, 不需要精确了解被控制对象。稳健控制需要根据已知的信息确定系统的标称模型和系统的不确定性界限, 通过优化一定的性能指标来求解控制器, 本质上属于最优控制。稳健控制器一般比较复杂, 因此在实际应用中还需要考虑工程实现的复杂性问题。

AO 系统中稳健控制的研究还不成熟, 对于某些问题的研究才刚开始, 以下若干问题可能是有意义的研究方向:

- 1) AO 系统中各单元回路的延时和增益都存在差异, 在系统建模时存在着不确定性;
- 2) AO 系统中各驱动器之间的耦合效应存在着不确定性, 如何应用稳健控制处理耦合效应不确定性的影响;
- 3) 噪声在 AO 系统中是不确定的, 如何抑制 AO 系统中不确定的噪声影响;
- 4) 稳健控制器可以使 AO 系统具有较好的稳健稳定性, 但是设计时具有保守性, 在一定程度上会损失系统的动态性能, 如何在提高系统稳健稳定性的前提下降低设计的保守性;

5) 稳健控制器比较复杂, 如何进行降阶设计并简化控制器结构, 使其在工程实践中得以应用。

参 考 文 献

- 1 Zhou Renzhong, Yan Jixiang, Zhao Dazun, *et al.*. Adaptive optics [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1996: 1-3.
周仁忠, 阎吉祥, 赵达尊, 等. 自适应光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996: 1-3.
- 2 Hu Shousong, Wang Zhiquan, Hu Weili. Optimal control theory and systems [M]. Beijing: Science Press, 2005: 225-226.
胡寿松, 王执铨, 胡维礼. 最优控制理论与系统[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 225-226.
- 3 Wu Min, He Yong, She Jinhua. Robust control theory[M]. Beijing: Higher Education Press, 2010: 301-320.
吴敏, 何勇, 余锦华. 鲁棒控制理论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010: 301-320.
- 4 Ji Wei, Li Qi, Xu Bo, *et al.*. Analysis and design of robust self-tuning IMC for opto-electronic tracking system [J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(9): 2247-2254.
姬伟, 李奇, 许波, 等. 光电跟踪系统鲁棒自调整内模型控制设计与分析[J]. 光学精密工程, 2009, 17(9): 2247-2254.
- 5 Zhang Wenbo, Fan Dapeng, Zhu Huazheng. Internal model control for electro-optical tracking servo system based on sampled-data control theory [J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(2): 222-228.
张文博, 范大鹏, 朱华征. 基于采样控制理论的光电跟踪伺服系统内模控制[J]. 光学精密工程, 2008, 16(2): 222-228.
- 6 Wang Chongchong, Hu Lifa, He Bin, *et al.*. Hysteresis compensation method of piezoelectric steering mirror based on neural network [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(11): 1113001.
王冲冲, 胡立发, 何斌, 等. 基于神经网络的压电倾斜镜磁滞补偿方法研究[J]. 中国激光, 2013, 40(11): 1113001.
- 7 Ge Dongyuan, Yao Xifan, Xiang Wenjiang. Application of hybrid mutation neural network and fuzzy adaptive particle-swarm optimization algorithm in testing of micro-drill [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(3): 0312002.
葛动元, 姚锡凡, 向文江. 混合变异神经网络与模糊自适应粒子群优化算法在微钻头检测中的应用[J]. 光学学报, 2013, 33(3): 0312002.
- 8 Zames G. Feedback and optimal sensitivity: Model reference transformations, multi-plicative seminorms and approximate inverses [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1981, 26(2): 301-320.
- 9 Doyle J C, Glover K, Khargonekar P P. State-space solutions to standard H_2 and H_∞ control problems [C]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1989, 34(8): 831-846.
- 10 Jiang Wenhan. Adaptive optics technology [J]. Chinese Journal of Nature, 2005, 28(1): 7-13.
姜文汉. 自适应光学技术[J]. 自然杂志, 2005, 28(1): 7-13.
- 11 Denis N, Loose D, Huang J, *et al.*. H_∞ control design for an adaptive optics system [J]. Kybernetika, 1999, 35(1): 69-81.
- 12 Miller D W, Grocott S C D. Robust control of the multiple mirror telescope adaptive secondary mirror [J]. Optical Engineering, 1999, 38(8): 1276-1287.
- 13 Winters S E, Chung J H, Velinsky S A. Dynamic modeling and control of a deformable mirror [J]. Mechanics Based Design of Structures and Machines, 2004, 32(2): 195-213.
- 14 Frazier B W, Smith M, Tyson R K. Performance of a compact adaptive-optics system [J]. Applied Optics, 2004, 43(22): 4281-4287.
- 15 Frazier B W, Tyson R K, Smith M. Theory and operation of a robust controller for a compact adaptive optics system [J]. Optical Engineering, 2004, 43(12): 2912-2920.
- 16 Piatrou P, Gilles L. Robustness study of the pseudo open-loop controller for multiconjugate adaptive optics [J]. Applied Optics, 2005, 44(6): 1003-1010.
- 17 Baudouin L, Prieur C, Guignard F, *et al.*. Robust control of a bimorph mirror for adaptive optics systems [J]. Applied Optics, 2008, 47(20): 3637-3645.
- 18 Iqbal A. Modeling and control of a magnetic fluid deformable mirror for ophthalmic adaptive optics systems [D]. Toronto: University of Toronto, 2009.
- 19 Iqbal A, Wu Z Z, Amara F B. Mixed-sensitivity H_∞ control of magnetic-fluid-deformable mirrors [J]. IEEE/ASME

- Transactions on Mechatronics, 2009, 15(4): 548-556.
- 20 Guesalaga A, Guzman D, Myers R, *et al.*. Control of deformable mirrors in MOAO using H_∞ optimization[C]. SPIE, 2009, 7439: 74390N.
- 21 Wu Z Z, Iqbal A, Amara F B. LMI-based multivariable PID controller design and its application to the control of the surface shape of magnetic fluid deformable mirrors[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2011, 19(4): 717-729.
- 22 Kim J J, Burtz D C, Agrawal B N. Wavefront correction of optical beam for large space mirrors using robust control techniques[J]. Acta Astronautica, 2011, 68: 141-148.
- 23 Neichel B, Rigaut F, Guesalaga A, *et al.*. Kalman and H-infinity controllers for GeMS[C]. Applied Industrial Optics: Spectroscopy, Imaging and Metrology, Toronto, 2011: JWA32.
- 24 Agrawal B, Kubby J. Applications of MEMS in segmented mirror space telescopes[C]. SPIE, 2011, 7931: 793102.
- 25 Guesalaga A, Neichel B, Rigaut F, *et al.*. Comparison of vibration mitigation controllers for adaptive optics systems[J]. Applied Optics, 2012, 51(19): 4520-4535.
- 26 Mauch S, Reger J. Application of μ -synthesis based H_∞ -control for adaptive optics in laser material processing[C]. 2013 IEEE International Conference on Control Applications, Hyderabad, 2013: 941-947.
- 27 Guesalaga A, Neichel B, O'Neal J, *et al.*. Mitigation of vibrations in adaptive optics by minimization of closed-loop residuals[J]. Optics Express, 2013, 21(9): 10676-10696.
- 28 Reziwan Maimaiti, Alimujiang Yiming, Fulati Abulimiti. Design of a simple compensator for adaptive optics system[J]. Journal of Xinjiang University (Natural Science Edition), 2013, 30(3): 365-368.
热孜万·买买提, 阿里木江·依明, 甫拉提·阿不力米提. 自适应光学系统简易鲁棒补偿器设计[J]. 新疆大学学报(自然科学版), 2013, 30(3): 365-368.
- 29 Folcher J P. Anti-windup control of tip-tilt mirror[C]. SPIE, 2014, 9148: 91484H.
- 30 Zhao Xin, Ma Caiwen. Research on nonsmooth H_∞ control for the adaptive optics system[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(9): 0901003.
赵欣, 马彩文. 自适应光学系统的非光滑 H_∞ 控制研究[J]. 光子学报, 2014, 43(9): 0901003.
- 31 Zhao Xin, Ma Caiwen. Design and simulation of the adaptive optics system based on mixed H_2/H_∞ control[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(12): 1201003.
赵欣, 马彩文. 基于混合 H_2/H_∞ 控制自适应光学系统设计与仿真[J]. 光子学报, 2014, 43(12): 1201003.
- 32 Zhao Xin. Research of robust control for the piezoelectric-deformable-mirror-based adaptive optics system[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2014: 45-73.
赵欣. 基于压电变形镜的自适应光学系统鲁棒控制研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2014: 45-73.
- 33 Wang Dejin. H_2 and H_∞ optimal control theory[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2001: 214-220.
王德进. H_2 和 H_∞ 优化控制理论[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2001: 214-220.
- 34 Zhang Xianku, Jia Xinle, Wang Xingcheng, *et al.*. Review of the development of H_∞ robust control theory in the past decade[J]. Control and Decision, 1997, 14(4): 289-296.
张显库, 贾欣乐, 王兴成, 等. H_∞ 鲁棒控制理论发展的十年回顾[J]. 控制与决策, 1999, 14(4): 289-296.