

引用格式:张旭旭,尹达一. 大口径快摆镜鲁棒控制器设计[J]. 电光与控制,2017,24(10):110-113. ZHANG X X, YIN D Y. Robust controller design for large-aperture fast steering mirror system[J]. Electronics Optics & Control, 2017, 24(10):110-113.

大口径快摆镜鲁棒控制器设计

张旭旭^{1,2,3}, 尹达一^{1,2}

(1. 中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083;

2. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083; 3. 中国科学院大学, 北京 100039)

摘要: 为了满足深空天文观测的高质量成像,对空间望远镜的系统稳像精度提出了很高的要求。大口径快摆镜(LAFSM)的控制是实现天文观测中精密稳像系统的关键,其性能决定了空间望远镜的视轴稳定精度。采用内模控制与 H_∞ 结合的方式,设计了复合精密稳像控制系统,并对其控制性能进行了分析。仿真结果表明,控制器具有较强的稳定性和鲁棒性。

关键词: 深空探测; 大口径快摆镜; 内模控制; H_∞ ; 鲁棒控制

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2017.10.022

Robust Controller Design for Large-Aperture Fast Steering Mirror System

ZHANG Xu-xu^{1,2,3}, YIN Da-yi^{1,2}

(1. CAS Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Shanghai 200083, China;

2. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Science, Shanghai 200083, China;

3. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China)

Abstract: To guarantee high image quality of astronomical observation, high-precision stabilization system is needed for space telescope. The control of Large-Aperture Fast Steering Mirror (LAFSM) is the key for realizing precise image stabilization, whose performance determines the boresight stabilization accuracy of the space telescope. Both Internal Model Control (IMC) and H_∞ are employed to design a compound control system, and an analysis is made to its controlling performance. The simulation results show that the controller has strong stability and robustness.

Key words: deep space detection; large-aperture fast steering mirror; internal model control; H_∞ ; robust control

0 引言

深空探测一直是世界各国研究的热点,空间望远镜作为空间探测的一种手段,在研究宇宙演化、黑洞等前沿领域发挥着重要作用。空间望远镜的长时间曝光与高质量成像对系统的稳像精度提出了很高的要求。目前, Hubble 望远镜的视轴稳定精度为 $0.007''^{[1]}$,即将发射的 JWST 为 $0.0073''^{[2]}$, NASA 于 2016 年正式立项了宽视场红外巡天望远镜 WFIRST^[3],其视轴抖动要求 RMS 为 $0.0014''$ 。要实现如此高的稳像精度,就必

须研究相应的精密稳像控制系统。快摆镜作为控制光束方向的反射镜被广泛应用于精密稳像控制系统。随着天文望远镜视场和口径的增加,相应的快摆镜口径也越来越大,对位置分辨率、闭环控制频率和抗扰动的能力提出更高的要求。因此,在稳像控制设计过程中需采取有效的控制方法,克服外界干扰对视轴产生的扰动,使视轴稳定在固定的惯性空间方向上^[4]。

精密稳像系统一般采用多级复合控制系统,大口径快摆镜(LAFSM)作为其中的重要执行机构,能够在小范围内实现高精度的光线调整。因此,设计大口径快摆镜的控制器,是实现精密稳像控制的关键。丁科等人提出了自适应前馈复合控制的快摆镜控制方案^[5];杨东等人采用模型参考算法设计了快摆镜控制器^[6]。本文从鲁棒性角度出发,设计了一种鲁棒复合控制方法。

收稿日期:2016-10-17 修回日期:2016-12-06

基金项目:国家自然科学基金(40776100)

作者简介:张旭旭(1985—),男,甘肃西和人,博士生,研究方向为天文学导航与控制。

1 快摆镜控制系统

大口径快摆镜的结构主要由底座、反射镜、驱动器以及柔性弹性支撑机构组成。系统所用的 LAFSM, 口径 500 mm × 700 mm, 短轴惯量 0.176 kg · m², 长轴惯量 0.276 kg · m², 采用四压电陶瓷 (PZT) 驱动器驱动。

大口径快摆镜控制系统采用复合控制的方式, 主要由控制器、压电陶瓷驱动器、电阻应变片式 (SGS) 反馈单元、精细导星仪 (FGS) 反馈单元等组成, 如图 1 所示。内闭环控制器用来补偿大口径快摆镜的误差, 光闭环控制器根据精细导星仪获取的质心指向偏差来调节视轴指向。

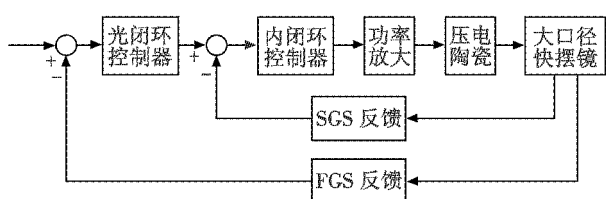


图 1 快摆镜控制系统

Fig. 1 Fast steering mirror control system

压电陶瓷微位移驱动器具有体积小、位移分辨率高、响应快、推力大、无噪声及发热小等一系列优点, 广泛应用于各种精密仪器和机电一体化设备^[7]。快摆镜和压电陶瓷驱动器之间采用柔性铰链的方式连接, 可以有效地减少摩擦。SGS 检测压电陶瓷驱动器引起的位移偏移量作为初级反馈。精细导星仪作为大口径快摆镜的光闭环反馈, 通过质心细分提取, 可实现视轴偏移量毫弧度级别的检测。针对压电陶瓷驱动的微位移系统, 文献[8-9]经过系统辨识的方法, 得到一类被控对象模型为

$$P(s) = \frac{K}{s^3 + as^2 + bs + c} \quad (1)$$

令 $K = 507\ 620\ 000, a = 1058, b = 745\ 300, c = 730\ 100\ 000$, 得到大口径快摆镜的模型为

$$P(s) = \frac{507\ 620\ 000}{s^3 + 1058s^2 + 745\ 300s + 730\ 100\ 000} \quad (2)$$

2 控制器设计

2.1 内闭环设计

内模控制^[10-11] (Internal Model Control, IMC) 是一种基于过程数学模型进行控制器设计的新型控制策略。内模控制器的基本结构如图 2 所示。

图 2 的控制结构进行变换, 得到图 3 的简化结构。其中, r, y 和 d 分别为控制系统的输入、输出和干扰信号。

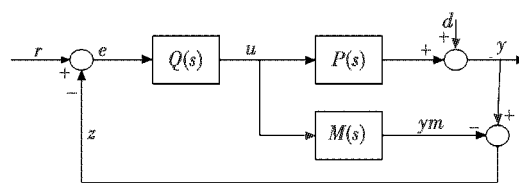


图 2 内模控制原理结构

Fig. 2 Basic structure of internal model control

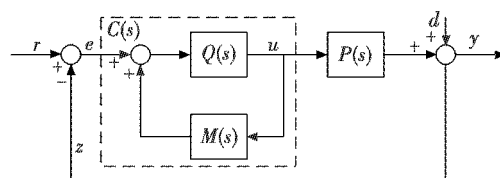


图 3 内模控制等效反馈结构

Fig. 3 Equivalent feedback structure of internal model control

需要设计的反馈控制器为

$$C(s) = \frac{Q(s)}{1 - Q(s)M(s)} \quad (3)$$

输入输出响应为

$$\frac{y}{r} = \frac{C(s)P(s)}{1 + C(s)P(s)} \quad (4)$$

输出对扰动的响应为

$$\frac{y}{d} = \frac{1}{1 + C(s)P(s)} \quad (5)$$

将式(3)代入式(4)和式(5)得到图 3 的闭环响应为

$$y = \frac{Q(s)P(s)r}{1 + Q(s)[P(s) - M(s)]} + \frac{1 - Q(s)M(s)}{1 + Q(s)[P(s) - M(s)]}d \quad (6)$$

当过程 $P(s)$ 稳定且模型精确时, $P(s) = M(s)$, 设计控制器 $Q(s) = M^{-1}(s)$, 当外界扰动 $d = 0$ 时, $y = r$ 。

令 $M(s) = M_a(s)M_p(s)$, 其中, $M_a(s)$ 为模型中包含纯滞后和不稳定零点部分, $M_p(s)$ 为最小相位部分。设计过程中, 一般给 $M_p(s)$ 增加低通滤波器 $F(s)$, 则内模控制器为

$$Q(s) = M^{-1}(s)F(s) \quad (7)$$

式中, $F(s) = \frac{1}{(\lambda s + 1)^n}$ 。

对于低通滤波器 $F(s)$, 考虑最终控制器的可实现性, 取 $n = 3$, 则

$$F(s) = \frac{1}{(\lambda s + 1)^3} \quad (8)$$

很明显, $F(s)$ 为三阶巴特沃斯滤波器低通滤波器。通过上文的分析, 取 $P(s) = M(s)$, 根据式(7)和式(8)可得内模控制器为

$$Q(s) = M^{-1}(s)F(s) = P^{-1}(s)F(s) = \frac{s^3 + as^2 + bs + c}{K(\lambda s + 1)^3} \quad (9)$$

将式(2)和式(9)代入式(3)得到相应的反馈控制器为

$$C(s) = \frac{Q(s)}{1 - Q(s)M(s)} = \frac{s^3 + as^2 + bs + c}{K(\lambda^3 s^3 + 3\lambda^2 s^2 + 3\lambda s)} \quad (10)$$

与 PID 控制相比,内模控制器只需要整定一个参数 λ ,明显降低了调整难度。系统的动态性能由 λ 决定,可通过调整 λ 在动态性能和鲁棒性之间进行平衡。对于式(2)给出的三阶被控对象 $P(s)$,取 $\lambda = 0.001$,可得

$$C(s) = \frac{1.97s^3 + 2084s^2 + 1\,468\,000s + 1\,438\,000\,000}{s^3 + 3000s^2 + 3\,000\,000s} \quad (11)$$

2.2 光闭环设计

为了提高整个系统的鲁棒性,特别是光闭环控制器的扰动抑制能力,采用基于混合灵敏度的 H_∞ 控制进行光闭环控制器设计。 H_∞ 要求在不确定性参数扰动下,达到所需的稳定性指标^[12]。从图 3 的控制结构可以得到式(12)和式(13),定义 $S(s)$ 为灵敏度函数, $T(s)$ 为补灵敏度函数,则

$$S(s) = \frac{1}{1 + P(s)C(s)} \quad (12)$$

$$T(s) = \frac{P(s)C(s)}{1 + P(s)C(s)} \quad (13)$$

灵敏度 $S(s)$ 的无穷范数可以表征扰动 d 对输出 y 的传递作用, $S(s)$ 无穷小于 1,则 y 对 d 一致衰减,系统的抗干扰能力比较好。同时, $S(s)$ 是误差 e 与输入 r 之间的传递函数, $S(s)$ 奇异值越小,系统的跟踪能力越强。补灵敏度 $T(s)$ 的无穷范数可以表征输入 r 对输出 y 的影响, $T(s)$ 无穷小于 1,则可以保证系统的动态性能和稳定性。

此外,将图 3 中 r 到 u 的关系记作 $R(s)$,即

$$R(s) = C(s)S(s) = C(s)(1 + C(s)P(s))^{-1} \quad (14)$$

$\|R(s)\|_\infty$ 表示加性扰动 $P(s) + \Delta P(s)$ 中允许扰动 $\Delta P(s)$ 幅度大小的度量,用于调整中低频的鲁棒稳定性。

根据鲁棒控制第一定理^[13],引入加权函数 $W_1(s)$, $W_2(s)$ 和 $W_3(s)$,得到混合灵敏度的控制要求

$$\sup[\|W_1(j\omega)S(j\omega)\|^2 + \|W_2(j\omega)T(j\omega)\|^2 + \|W_3(j\omega)R(j\omega)\|^2] < \gamma^2 \quad (15)$$

依据 H_∞ 控制指标可知混合灵敏度的 H_∞ 控制的设计目标为

$$\left\| \begin{array}{l} W_1(s)S(s) \\ W_2(s)R(s) \\ W_3(s)T(s) \end{array} \right\| < \gamma \text{ 或 } \min \left\| \begin{array}{l} W_1(s)S(s) \\ W_2(s)R(s) \\ W_3(s)T(s) \end{array} \right\|_\infty \quad (16)$$

按照该目标,寻找真实的有理函数控制器 $C_{\text{opt}}(s)$,使闭环系统稳定。

根据 2.1 节得到的内闭环的传递函数,考虑抗干扰能力和系统的动态品质要求,选取 $W_1(s) = \frac{(0.01s+1)^2}{0.01(s+1)(s/70+1)}$, $W_3(s) = \frac{0.001(s+300)}{0.1s+1}$ 。对于加性扰动,系统设计的目的是为了在中低频范围内具有较大的鲁棒性参数扰动范围,可考虑选择一个常数进行调整,结合已经确定的 $W_1(s)$ 和 $W_3(s)$,取 $W_2(s) = 0.001$ 。利用上述优化得到的加权函数,即可得到最优 H_∞ 控制器 $C_{\text{opt}}(s)$ 。

由于得到的控制器一般为高阶控制器,考虑设计的方便,采用 Hankel 范数^[14]最优控制器降阶法将其降阶为低阶控制器。Hankel 范数最优降阶的目的是获取模型降阶误差 H_∞ 范数的较小下界,在误差接受的范围对控制器降阶,减少控制器的计算量。经过计算,最优控制器为

$$C_{\text{opt}}(s) = \frac{13.058(s+1649)(s^2+1370s+70\,480)}{(s+0.9701)(s^2+14\,370s+101\,500\,000)} \quad (17)$$

3 仿真实验

对于反馈控制器, λ 的选取很关键,依次取 $\lambda = 0.001$ 到 $\lambda = 0.010$,对整个闭环系统求取阶跃响应,仿真结果如图 4 所示。

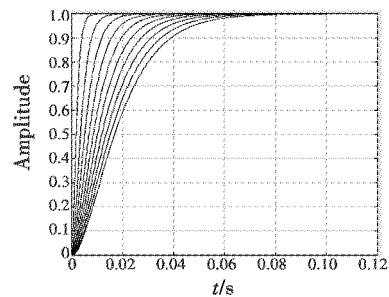


图 4 内闭环在不同 λ 值的内模控制阶跃响应

Fig. 4 Internal model control step response with different λ for internal close loop

从仿真结果可以看出,对于此类微位移系统, λ 越小,系统响应速度越快, λ 越大,系统的稳定速度越慢。综合考虑,保证系统的稳定性和响应速度,取 $\lambda = 0.001$ 。

文献[15]对被控对象分别基于遗传算法和构造理想二阶系统函数法设计了 PID 控制器。通过遗传算法整定优化的 PID 参数为 $k_p = 0.020\,4$, $k_d = 0.001\,2$, $k_i = 742.368\,7$;通过构造理想二阶系统整定出的 PID 控制参数为 $k_p = 0.032\,6$, $k_d = 0.001$, $k_i = 711.93$ 。根据图 4 的仿真结果,内模控制器取 $\lambda = 0.001$ 。对 3 种控制器求取阶跃响应,并在 $t = 0.12\,s$ 时增加幅值为 0.2 的负扰动,仿真结果如图 5 所示。

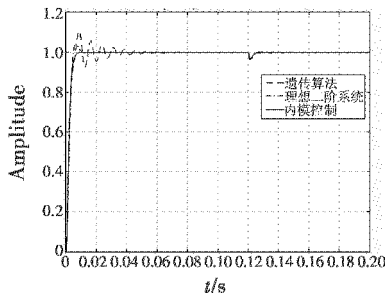


图 5 具有扰动的内闭环阶跃响应对比分析
Fig.5 Internal close loop step response comparative analysis with disturbance

由图 5 可以看出,内模控制器与另外两种控制器相比,对于同样的阶跃响应,几乎没有超调,系统响应比较平滑;对于同样的外部扰动,内模控制器能快速恢复稳态,其扰动抑制效果和鲁棒性能较好。

采用内模控制和 H_∞ 结合的复合控制系统,其抑制干扰的能力如图 6 所示。通过分析可以看出,内闭环对于 100 Hz 低频扰动的抑制最为明显,结合光闭环回路以后,复合控制系统在 100 Hz 频率以下的扰动抑制能力在 -56 dB。但是对于高频噪声的抑制能力较弱,特别是在 1000 Hz 处抑制能力明显变弱,对于该频段,可考虑借助精密稳像系统的隔振平台进行消除。

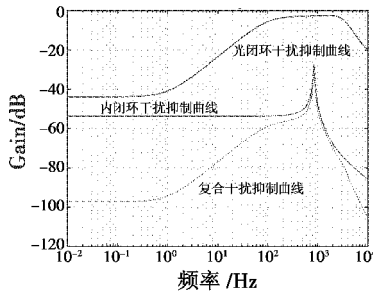


图 6 扰动抑制曲线
Fig.6 Disturbance rejection curve

再考察该系统对正弦信号的跟踪能力,取正弦输入信号为 $r = 5 \times 10^{-5} \sin(100t)$,可以看到其相应的正弦跟踪误差曲线如图 7 所示,在输入幅值为 $50 \mu\text{rad}$ 时,复合控制系统的跟踪误差在 $\pm 2.1 \mu\text{rad}$ 。可见对于大口径快摆镜的微位移信号,其跟踪能力较强。

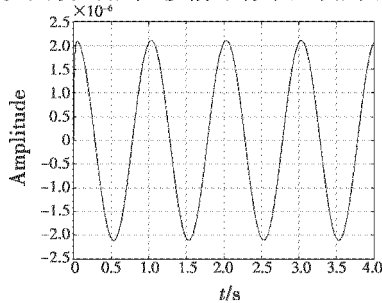


图 7 正弦信号跟踪误差曲线
Fig.7 Error curve of sine signal tracking

4 结束语

本文从精密稳像的角度论述了大口径快摆镜的精密控制方法,通过对内模控制和混合灵敏度 H_∞ 控制的研究,实现了大口径快摆镜的复合控制系统的设计。仿真结果表明,内模控制器能够简化系统设计,具有较强的鲁棒性和稳定性;基于 H_∞ 控制的方法,进一步提高了系统的鲁棒性和扰动抑制能力,其跟踪误差可以达到 $\pm 2.1 \mu\text{rad}$,满足稳像精度的要求。对于探索我国空间望远镜精密稳像系统提供了一种参考方法。

参考文献

- [1] MATTHEW D L. Experience with the Hubble space telescope;20 years of an archetype[J]. Optical Engineering, 2012, 51(1):011011-1-011011-18.
- [2] JONATHAN P. The James webb space telescope [Z]. NASA.
- [3] NASA. WFIRST instrument reference information. [EB/OL].[2016-09-27]. http://wfirst.gsfc.nasa.gov/science/Inst_Ref_Info_Cycle6.html.
- [4] 曹小涛,孙天宇,赵运隆,等. 空间大口径望远镜稳像系统发展现状及趋势[J]. 中国光学, 2014(5):739-748.
- [5] 丁科,黄永梅,马佳光,等. 快速反射镜的误差自适应前馈复合控制[J]. 中国激光, 2011(7):184-189.
- [6] 杨东,毛耀,丁科,等. 模型参考算法在快速反射镜中的应用[J]. 红外与激光工程, 2013(10):2790-2795.
- [7] 赵碧杉,尹达一,曾攀,等. 高精度大功率压电陶瓷驱动关键技术[J]. 压电与声光, 2013(6):853-857.
- [8] 史少龙,尹达一,龚惠兴. 大口径快摆镜机构系统辨识及控制参数优化[J]. 中国惯性技术学报, 2014(2):161-166, 216.
- [9] 闫鹏,张震,郭雷,等. 超精密伺服系统控制与应用[J]. 控制理论与应用, 2014(10):1338-1351.
- [10] RIVERA D E, MORARI M, SKOGSTAD S. Internal model control. 4. PID controller design[J]. Industrial & Engineering Chemistry, Process Design and Development, 1986, 25(1):252-265.
- [11] 李洪文. 基于内模 PID 控制的大型望远镜伺服系统[J]. 光学精密工程, 2009(2):327-332.
- [12] KWAKERNAAK H. Robust control and H_∞ -optimization [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1993, 29(2):255-273.
- [13] 马瑞,卢毅. H_∞ 控制器设计中的相关问题讨论[J]. 西北工业大学学报, 1996(2):259-264.
- [14] GLOVER K. All optimal Hankel-norm approximations of linear multivariable systems and their L_∞ -error bounds [J]. International Journal of Control, 1984, 39(6):1115-1193.
- [15] 史少龙. 空间望远镜精密稳像控制关键技术研究 [D]. 上海:中国科学院研究生院, 2014.