巨型望远镜的鲁棒控制策略研究

董志明[1,2,3], 徐欣圻[1]

(1. 中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所,江苏 南京 210042)
(2. 中国科学院研究生院,北京 100049)
(3. 重庆科技学院电子信息工程学院,重庆 400042)

[摘要] 介绍了大望远镜机架控制系统的特异性,分析了影响控制系统性能的非线性干扰. 比较了两种鲁棒控制理论,指出 H∞控制更适用于望远镜的机架伺服系统. 基于 H∞控制理论,将非线性摩擦转矩处理为标称系统的输出端乘法摄动,把克服非线性摩擦转矩的影响转化为提高系统对模型摄动的鲁棒性;同时也考虑了系统对风扰力矩的抑制能力. 通过 MATLAB编程得到了一个 H∞速度控制器,仿真结果表明,该控制方案相比传统的 PID控制有更高的鲁棒性及可以实现更高精度的跟踪与校正.

[关键词] 跟踪,超低速,H∞控制,望远镜
[中图分类号] TP273+. 1 [文献标识码] A [文章编号] 1001-4616 (2007) 03-0044-04

Study on Robust Control Methods for Giant Telescope

Dong Zhiming[1,2,3], Xu Xinqi[1]

(1. National Astronomical Observatories, Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, China)
(2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)
(3. School of Electronic & Information Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 400042, China)

Abstract: This paper introduces the specialties of giant telescope mount control system, analyses the non-linear disturbance which reduces the performance of control system, compares two robust control theory and points out that H-infinity control theory is more suitable for telescope mount control system. Based on the theoretical framework of H-infinity control: Non-linear friction torque is regarded as model output multiplicative perturbation. The problem is transformed into how to improve system robustness on model perturbation and wind load disturbance. A suitable H-infinity velocity controller is obtained by programming in MATLAB. Computer simulation result shows that the controller which is designed by H-infinity control theory improves system robustness and the precision of tracking

Key words: tracking, ultra-low speed, H-infinity control, telescope

0 引言

建造巨型天文光学望远镜是为了获取遥远太空的微弱光信号,在观测过程中望远镜需要高精度地跟踪这些微弱的光信号长达数小时来获取有价值的光谱.

国家九五重大科学工程 (Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope)简称 LAMOST, 是一架卧式中星仪式反射施密特望远镜. 建成后,将成为世界上大视场兼大口径的光学天文望远镜之最. LAMOST水平轴被驱动部分转动承载为:重量 50 t,摩擦转矩 2 000～4 000 Nm,转动惯量 3.28×10^5 kg·m^2. 俯仰轴被驱动部分转动承载为:重量 20 t,摩擦转矩 320～800 Nm,转动惯量 2.30×10^4 kg·m^2. 水平轴跟踪时的速度为 0～15″/s,俯仰轴跟踪速度为 0～2″/s 跟踪精度要求为:经闭环导星跟踪 3 h的法线指向

收稿日期: 2007-05-28. 修回日期: 2007-06-30.
基金项目:国家九五重大科学工程项目.
作者简介:董志明 (1974—),博士,主要从事天文技术与方法的学习与研究. E-mail: dooyomi@yahoo.com.cn

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

误差的均方根值不超过 0.23″[1]. 由以上描述可以知道,LAMOST的机架驱动伺服系统的特异性在于超大惯量、超低转速和位置伺服的高精度.

1 LAMOST的驱动方式

小口径的天文光学望远镜通常采用齿轮机构连接电机与转台. 但是齿轮机构存在高频齿形误差及反向传动间隙,难以实现更高精度的驱动控制精度,不适用于巨型望远镜. LAMOST的地平式机架采用的是摩擦驱动方式[1],如图 1所示,水平方位转台为从动轮,分布在其圆周外围的 6个小摩擦轮为主动轮,每个主动轮的转轴分别与 1个直流力矩电机相连,主动轮和从动轮依靠加力装置压紧. 当电机转动时,主动轮通过摩擦力的作用将转矩传递到从动轮上. 摩擦传动的优点主要有:运转平稳,噪声小;摩擦轮可以做到十分平滑,使得高频误差分量小;无间隙,机械效率高等.

水平方位转台驱动系统的传递函数框图见图 2,其中 V_{da} 为输入电压; V_a 为控制电压; V_e为测速反馈电压; K为 H∞速度控制器; K_t为力矩电机的转矩系数; K_{tg}为测速发电机转换系数; θ为转台角位置; Ω为转台角速度; Ω_d 为电机角速度; N 为转速比.

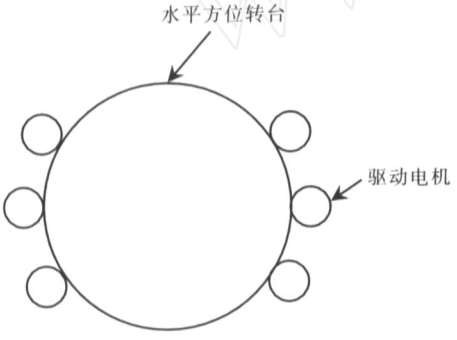

图 1 水平方位轴摩擦驱动

Fig.1 Friction drive of azimuth

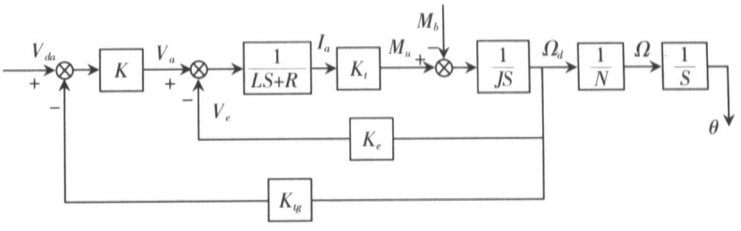

图 2 水平方位转台传递函数框图

Fig.2 Block diagram of azimuth drive transfer function

2 驱动系统存在的主要干扰

巨型望远镜的驱动伺服系统存在两个主要的非线性干扰,即风载干扰与非线性摩擦转矩.

为了避免光污染,获得良好的视宁度,巨型望远镜通常安放在远离城市的山顶或海边. 而这些无遮挡的观测点常伴随较大的风力,望远镜在观测时必须打开圆顶,风进入圆顶后作用在望远镜的机架上,形成干扰力矩.

望远镜在以角秒级的超低速跟踪天体时,系统的非线性摩擦转矩对伺服系统的跟踪精度的影响也非常大. 在转速接近零值时,系统的摩擦转矩随转速的增大而迅速减小,而当转速越过一个临界值时,摩擦转矩又随着转速的增大而缓慢增加[2,3]. 而望远镜的跟踪是超低速的变速运动,在很小的速度变化范围内摩擦转矩的急剧变化势必引起系统的爬行.

3 两种鲁棒控制策略的比较

为了抑制望远镜伺服系统的非线性干扰,有必要采用鲁棒控制策略. 鲁棒控制研究的一个重要分支是滑模变结构控制. 变结构控制系统的基本原理在于当系统状态穿越状态空间的滑动超平面时,反馈控制的结构就发生变化,从而使系统性能达到某个期望指标. 由此可以看出,变结构控制系统能够通过控制器本身结构的变化,使得系统性能保持高于一般固定结构能达到的性能,突破了经典线性控制品质限制,较好地解决了动态与静态性能指标之间的矛盾[4]. 具有滑动模态的变结构系统不仅对系统的不确定性因素具有较强的稳定鲁棒性和抗干扰性,而且可以通过滑动模态的设计获得满意的动态品质,同时控制简单易于实现. 目前变结构控制理论存在的突出问题是抖振问题. 理论上的滑动模态是光滑的,但实际不可避免的惯性使滑动模态上叠加了一个自振,这常常是有害的.

H∞最优控制是研究从评价输入到评价输出之间的传递函数的 H∞范数优化问题[5,6]. H∞控制器设计的目标就是寻找合适的反馈控制器,使该 H∞范数最小化. 由于传递函数的 H∞范数描述了有限输入能

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

量到输出能量的最大增益,故使传递函数 H∞范数最小,就可使干扰输入 ω到期望输出 z的最大影响降到最低程度. 但是由于 H∞控制考虑了系统的"最坏"情况下的鲁棒性,造成控制器设计的保守性较大,系统的动态性能不突出. 巨型望远镜驱动伺服系统的特点是大惯量、超低速、位置伺服高精度,采用 H∞控制理论与设计方法是一个好的选择. 有关 H∞控制在望远镜驱动控制上的应用见文献 [7, 8].

4　$H\infty$控制综合

本文采用的方案是设计一个 H∞速度控制器,其外围是一个标准的位置控制环. 位置环所做的主要工作是限位检查及轨迹计算等. 机架伺服系统的动态结构如图 3所示. 其中 K为 H∞速度控制器, P_0为标称系统 (包括直流力矩电机和机架),非线性摩擦转矩看作模型摄动 Δ, D为风载干扰.

将系统的摩擦阻力转矩看作理想系统模型的乘法摄动,鲁棒控制的目标是镇定模型摄动和抑制风载干扰,并提高伺服系统的跟踪精度. 为满足上述性能要求,建立如图 4所示评价信号. 图中, Ω_d为输出角速度; ω_2和 z_2是用于保证对乘法摄动鲁棒性的评价信号; z_3是对控制输入 u的评价信号; ω_1和 z_1是用于干扰响应评价的信号; W_2表示乘法摄动的加权函数; W_1表示干扰的加权函数; W_3是用于调节的参数,主要用于调整响应速度; W_4是用来调整控制输入大小的加权函数.

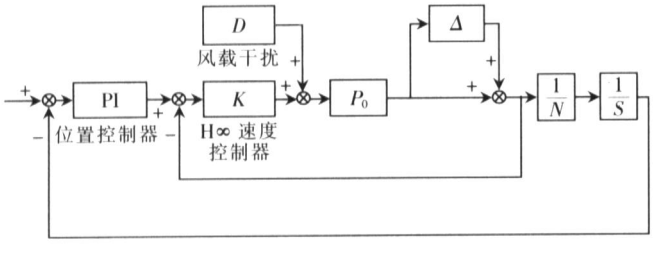

图 3　H∞ 速度环控制器

Fig.3　Velocity loop replaced with H∞ controller

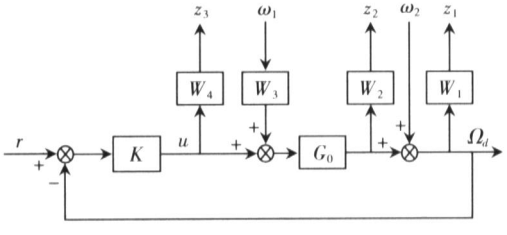

图 4　H∞ 控制综合

Fig.4　Synthesis of H∞ control

5　仿真结果

将风的干扰看作阶跃信号,选择瑞士 ETEL公司生产的 TMB140 - 150力矩电机进行仿真. 经反复试验,确定如下加权函数 $W_1 = \frac{0.2}{0.1s+1}$, $W_2 = \frac{0.2s+0.3}{s+10}$, $W_3 = 4\times10^7$, $W_4 = \frac{6\times10^{-9}s+1.4\times10^{-8}}{s+1}$.

经编程计算得到一个 H∞控制器, 其 BODE图如图 5所示.

图 6为跟踪幅值为 0.5 arcsec的正弦信号和误差曲线. 图 7是跟踪 1 arcsec/s^2的斜坡信号和误差曲线,仿真中在 3 s时加入 200 Nm的阶跃干扰信号来检验系统对风载干扰的抑制能力.

可以看出在速度过零点时,跟踪误差小于 6×10^{-8} rad/s(约合 0.012 arcsec/s),加入阶跃干扰信号时的瞬时跟踪误差小于 2×10^{-8} rad/s(约为 0.004 arcsec/s). 相比 PD控制能达到的 ±0.1 arcsec/s的跟踪误差有了极大的改善.

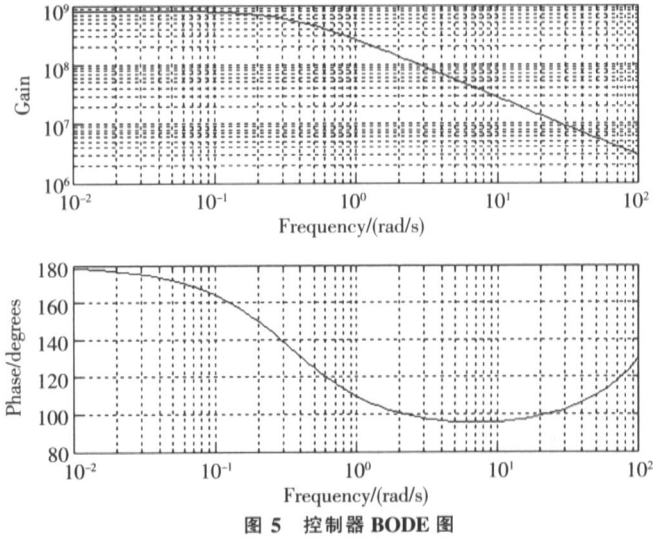

图 5　控制器 BODE 图

Fig.5　BODE diagram of controller

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

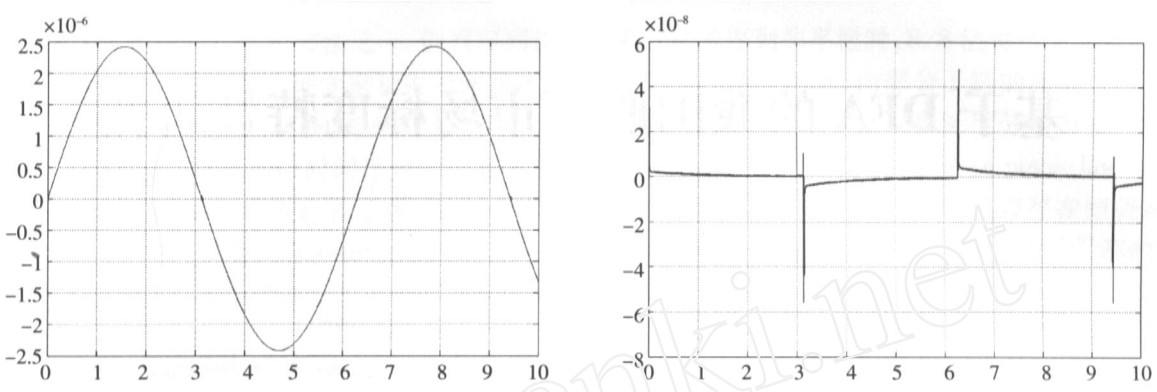

图 6 跟踪幅值为 0.5 arcsec 的正弦信号及误差曲线

Fig.6 Close loop response and error for 0.5 arcsec sinusoid

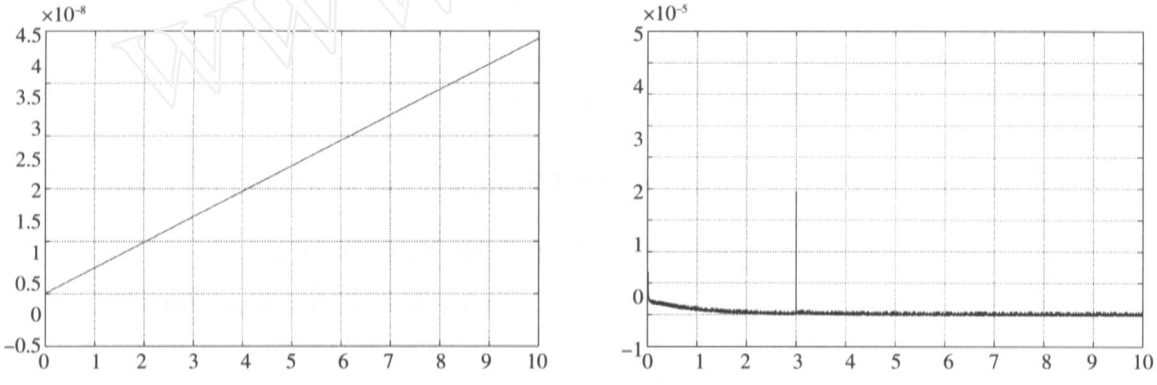

图 7 跟踪 1 arcsec/s² 的斜坡信号及误差曲线

Fig.7 Close loop response and error for 1 arcsec/s² ramp

6 小结

本文介绍了 LAMOST机架跟踪系统的特点,对望远镜受到的干扰进行了分析,比较了滑模变结构控制与 H∞控制的优缺点,指出 H∞控制更适用于巨型望远镜的机架伺服控制.针对系统的性能指标设定了评价信号并确定了相关的加权函数,最后给出了 MATLAB 仿真的结果,证明该控制方案相比 PID 控制可以更有效地克服系统的非线性摩擦阻力转矩及更好地抑制风载干扰,大大提高了跟踪的精度.

[参考文献]

[1] 徐欣圻. LAMOST望远镜控制系统[J]. 天体物理学报, 2000, 20(增刊): 43-52.

[2] Canudas De Wit C, Olsson H, Astrom K J, et al. A new model for control systems with friction[J]. IEEE Trans Automat Control, 1995, 40: 419-425.

[3] Canudas De Wit C. Comments on "A new model for control of systems with friction"[J]. IEEE Trans Automat Control, 1998, 43: 1 189-1 190.

[4] 高为炳. 变结构控制理论基础[M]. 北京:中国科学技术出版社, 1990.

[5] 梅生伟,申铁龙,刘康志. 现代鲁棒控制理论与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2003.

[6] Gu D W, Petkov P H r, Konstantinov M M. Robust Control Design With MATLAB[M]. London: Springer-Verlag, 2005.

[7] Gustavo A Medrano-Cerda, Robert D Lett, Paul Rees. H-infinity motion control system for a 2 m telescope[C]// Proceeding of SPIE, 2002, 4836: 88-97.

[8] Toomas Erm, Zdeněk Hurák, Bertrand Bauvir. Time to go H∞[C]// Proceeding of SPIE, 2004, 5496: 68-78.

[责任编辑:丁 蓉]

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net