

提高大口径望远镜控制系统闭环带宽的方法

邓永停, 李洪文, 王建立

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 为了提高大口径望远镜的抗风载扰动能力和对目标的跟踪精度, 要求望远镜控制系统有较好的动态性能和稳态跟踪精度, 望远镜的闭环控制带宽决定了控制系统的跟踪性能。因此, 首先根据望远镜结构的二质弹簧质量模型, 分析影响望远镜控制系统闭环带宽和动态响应的因素, 进而介绍提高闭环控制系统带宽的两种方法: 结构滤波器方法和加速度反馈控制方法; 然后, 详细分析了结构滤波器的设计方法及其望远镜控制系统中的应用; 最后, 分析了基于加速度反馈控制的设计方法以及该控制策略对提高望远镜控制系统闭环带宽的有效性。通过实验结果可以看出, 加速度反馈控制方法对提高望远镜控制系统闭环带宽更加有效。

关键词: 大口径望远镜; 闭环带宽; 结构滤波器; 加速度反馈

中图分类号: TP391.8 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1237001

Methods of improving closed-loop bandwidth for large telescope control systems

Deng Yongting, Li Hongwen, Wang Jianli

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to improve the performance of perturbation rejection and the accuracy of tracking for the large telescope, the control system of the telescope needs to have a good dynamic performance, which is due to the closed-loop bandwidth. Firstly, the factors that affect the closed-loop bandwidth and the dynamics of the telescope control system were analyzed, which were based on the two-mass spring-mass model of the telescope structure, and then two methods including structural filter and acceleration feedback methods which could improve the closed-loop bandwidth of the control system, were introduced. Secondly, the application of the structural filter and acceleration feedback methods in the telescope control system was analyzed in detail. Lastly, the related problems that the structural filter was used in the telescope control system were analyzed and the effectiveness of acceleration-feedback control for improving the closed-loop bandwidth was introduced. The experimental results demonstrate that compared with the structural filter method, the acceleration-feedback provides a better technology to improving the closed-loop bandwidth of control system for the large telescopes.

Key words: large telescope; closed-loop bandwidth; structural filter; acceleration-feedback

收稿日期: 2018-07-27; 修订日期: 2018-08-31

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(11603024)

作者简介: 邓永停(1987-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事望远镜精密跟踪控制方面的研究。Email: dyt0612@163.com

0 引言

随着大型光学望远镜口径的增大,其探测能力和成像分辨率的不断提升对望远镜的跟踪精度要求也越来越高。为了满足大口径望远镜低速、平稳跟踪的需求,要求望远镜的跟踪控制系统具有较好的动态性能和抗风载扰动能力,而伺服控制系统的闭环带宽决定了望远镜动态响应和抗干扰能力^[1-3]。大口径光学望远镜由于受机械结构的链接刚度和转动惯量的影响,其一阶锁转谐振频率值一般不超过 10 Hz^[4-5]。较低的结构锁转频率对控制系统的影响主要体现在以下两个方面:(1)较大速度回路闭环带宽会引起系统的振荡,为了保证系统的稳定性,需要降低速度环的闭环带宽,这会导致位置回路带宽的严重下降,通常位置回路带宽不超过一阶锁转谐振频率的五分之一,较低的位置环带宽使得控制系统的跟踪精度和抗风载扰动能力无法达到设计要求^[6]。(2)在大于—阶锁转频率的范围内,望远镜的结构与驱动电机产生解耦,此时望远镜的抗扰动能力将严重受限,在强扰动下系统难以达到符合指标要求的跟踪精度^[7]。因此,研究提高大口径望远镜闭环控制系统带宽的方法具有重要的意义。

在实际控制系统设计时,通常采用如下三种方法来提高系统闭环带宽:(1)采用额外的电机产生制动力矩以增大系统的阻尼,但是该方法在增加系统设计成本的同时增大了系统的摩擦力矩,提高了系统的控制难度。(2)采用结构滤波器来消除望远镜机械结构谐振^[8],但是该方法对机械结构变化引起的频率特性相位偏移非常敏感。随着望远镜使用年限的增加和望远镜转动惯量的变化,基于结构滤波器的方法可能导致控制系统的不稳定^[9]。(3)基于加速度反馈控制方法的效果类似于结构滤波器方法,不同的是该方法具有自适应调整的能力,加速度计能够实时检测到望远镜跟踪架的加速度信息,并将该信息反馈给速度回路以补偿外部扰动^[10-12]。

由于基于电机刹车增大阻尼的方法,在望远镜设计时会增加系统的复杂性,同时会降低控制系统的精度,因此,文中将重点讨论基于结构滤波器和基于加速度反馈的控制方法。首先建立望远镜控制系统二质弹簧质量模型,分析影响闭环带宽的因素;其

次,介绍结构滤波器原理及其在望远镜控制系统中的应用;最后,分析加速度反馈控制方法对提高望远镜控制系统闭环带宽的有效性。

1 望远镜二质弹簧质量模型及机械谐振

1.1 二质弹簧质量模型

在对大口径望远镜的方位轴或者俯仰轴的结构进行模型缩减时,主要考虑单轴的一阶谐振频率,经过简化后的二质弹簧质量模型如图 1 所示。该典型的二质模型主要包括驱动电机、望远镜的跟踪架、以及电机与跟踪架之间的传动部分。望远镜的传动方式通常有齿轮传动、摩擦轮传动、蜗轮蜗杆传动、以及直接驱动方式,其中直接驱动方式具有传动刚度大、系统谐振频率高、便于系统维护的优点。因此,文中讨论的大口径望远镜控制系统是基于直接传动方式的。在直接驱动的望远镜控制系统中,系统的位置检测元件——编码器安装在电机轴上,电机的测速采用位置差分的方式,因此望远镜跟踪架的运动信息无法被直接检测到。此外,二质弹簧质量模型会给系统引入振荡模态,这种模态对应于系统传递函数中的一对零极点。下面对二质弹簧质量模型进行建模,并分析系统的谐振问题。

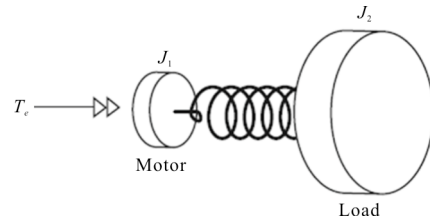


图 1 简化的望远镜结构模型

Fig.1 Simplified structural model of the telescope

图 2 表示简化后的弹簧质量模型。机械系统由

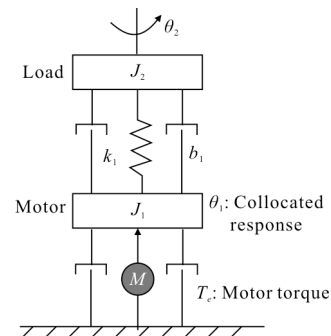


图 2 简化的二质弹簧质量模型

Fig.2 Simplified two-mass spring-mass model

电机力矩 T_e 驱动, T_l 表示负载端的扰动力矩, k_1 、 b_1 分别表示电机与负载之间机械连接的刚度系数和粘滞系数, J_1 、 J_2 分别表示电机和负载的转动惯量。力矩传动过程中, 电机端与负载端的角位置差值 $\Delta\theta = \theta_1 - \theta_2$, 通过电机轴传送的力矩值 T_s 表示为:

$$T_s = k_1 \Delta\theta + b_1 \frac{d(\Delta\theta)}{dt} = k_1 \Delta\theta + b_1 \Delta\omega \quad (1)$$

在电机端的动力学方程表达式如下:

$$J_1 \frac{d\omega_1}{dt} = T_e - T_s, \quad \frac{d\theta_1}{dt} = \omega_1 \quad (2)$$

式中: θ_1 、 ω_1 分别表示电机的角位置和角速度。

在负载端的动力学方程表达式如下:

$$J_2 \frac{d\omega_2}{dt} = T_s - T_l, \quad \frac{d\theta_2}{dt} = \omega_2 \quad (3)$$

式中: θ_2 、 ω_2 分别表示负载的角位置和角速度。

忽略负载扰动力矩 T_l 的情况下, 由公式(1)~(3)可得到如图 3 所示的模型传递函数框图, 因此, 由电

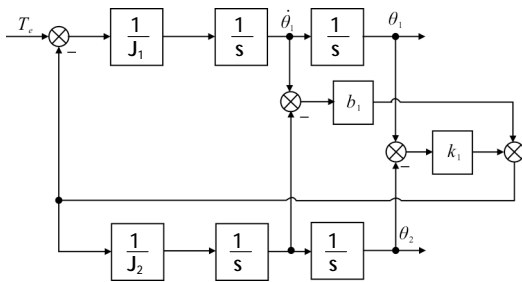


图 3 二质弹簧质量模型的传递函数框图

Fig.3 Block diagram of transfer function for the two-mass spring-mass model

机输出角位置到电机输入转矩的传递函数为:

$$\frac{\theta_1(s)}{T_e(s)} = \frac{1}{s^2 (J_1 + J_2)} \times \frac{J_2 s^2 + \frac{b_1}{k_1} s + 1}{J_1' s^2 + \frac{b_1}{k_1} s + 1} \quad (4)$$

由电机输出角速度到电机输入力矩的传递函数为:

$$\begin{aligned} \frac{\theta_1(s)}{T_e(s)} &= \frac{1}{s(J_1 + J_2)} \times \frac{J_2 s^2 + \frac{b_1}{k_1} s + 1}{J_1' s^2 + \frac{b_1}{k_1} s + 1} = \\ &= \frac{1}{s(J_1 + J_2)} \times \frac{\frac{1}{\omega_z^2} s^2 + 2 \frac{\zeta_z}{\omega_z} s + 1}{\frac{1}{\omega_p^2} s^2 + 2 \frac{\zeta_p}{\omega_p} s + 1} \quad (5) \end{aligned}$$

式中: J' 表示为 $J' = \frac{J_1 J_2}{J_1 + J_2}$ 。

公式(5)中含有一对共轭复零点和一对复极点, 复零点对应系统的反谐振频率(锁转频率) ω_z 和阻尼系数 ζ_z , 复极点对应系统的谐振频率 ω_p 和阻尼系数 ζ_p , 系统的锁转频率表达式为:

$$\omega_z = \sqrt{\frac{k_1}{J_2}}, \quad \zeta_z = \frac{b_1}{2\sqrt{k_1 J_2}} \quad (6)$$

系统的谐振频率表达式为:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{k_1}{J'}}, \quad \zeta_p = \frac{b_1}{2\sqrt{k_1 J'}} \quad (7)$$

1.2 机械谐振的影响因素分析

由公式(6)、(7)可知, 谐振的幅值和阻尼系数取决于结构的刚度系数、电机与负载的转动惯量的比值。结构的刚度系数越大, 会使系统的谐振频率越高, 谐振幅值越小, 有利于系统动态性能的提高。接下来重点分析电机与负载的转动惯量的比值对系统的频率特性的影响。根据公式(7), 定义如下谐振比值:

$$R = \frac{\omega_p}{\omega_z} = \sqrt{1 + \frac{J_2}{J_1}} \quad (8)$$

为了定量分析转动惯量比值 J_2/J_1 对传递函数 $\omega_1(s)/T_e(s)$ 频率特性的影响, 对锁转频率 ω_z 作标量化处理, 假设 $\omega_z = 1 \text{ rad/s}$ 选择不同 J_1/J_2 比值时, 进行频率特性的分析。实际望远镜系统中电机的转动惯量远小于负载转动量, 即 $J_1 \ll J_2$, 此时谐振比值 $R \gg 1$, 谐振频率 ω_p 远大于锁转频率 ω_z , 传递函数 $\omega_1(s)/T_e(s)$ 的伯德图如图 4 所示, 为了避免传递函数 $\omega_1(s)/T_e(s)$ 中存在较弱的共轭复数零点, 在 $J_1 \ll J_2$ 时, 通常将位置传感器安装在电机转子端, 这是因为如果将位置传感器安装在负载端, 较弱的共轭复数零点可能会降低控制增益, 使得负载转速 ω_2 与 ω^* 存在较大偏差。实际测试获得的某大型望远镜的频率特性曲线如图 5 所示。比较图 4 和图 5 可以看出: 望远镜结构与电机的转动惯量比是影响机械谐振的重要因素, 在不考虑望远镜高频动态特性影响的条件下, 二质弹簧质量模型能够比较好地反映控制系统的主要动态性能, 因此采用二质弹簧质量模型进行望远镜控制系统的前期分析设计是比较合适的。

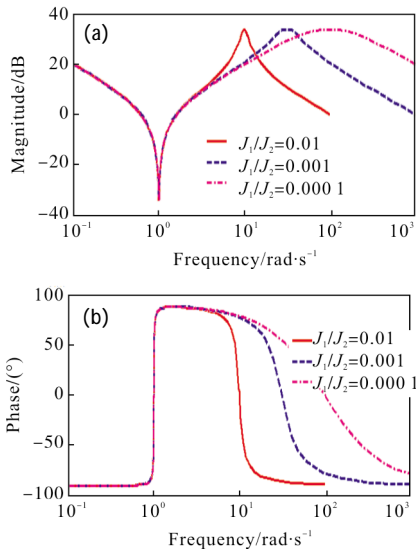


图 4 电机与负载惯量比变化时传递函数伯德图

Fig.4 Bode curve of transfer function with the variable inertia ratio of the motor to load

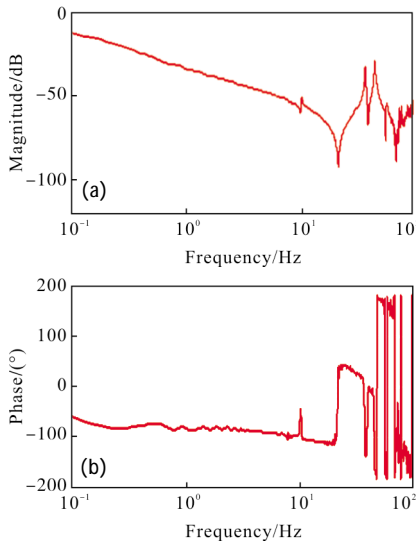


图 5 实测的传递函数伯德图

Fig.5 Bode curve of the tested transfer function

2 结构滤波器对系统闭环带宽的影响

由仿真分析结果(图 4)和实际测试结果(图 5)可以看出,伯德图的幅值曲线在谐振频率处有较大的峰值,如果控制信号的响应频率接近谐振频率,系统的动态响应将会不稳定,引起机械系统的振荡。为了减小谐振频率处的振荡,通常采用结构滤波器来滤除谐振频率处的控制信号,从而保持系统动态性能的稳定。

结构滤波器的应用目的是抑制在谐振频率处的

驱动力矩成分,提高控制系统的增益,进而提高系统的带宽和动态性能。结构滤波器的表达式为:

$$W_{SF}(s) = \frac{s^2 + 2\zeta_Z \omega_{NF} s + \omega_{NF}^2}{s^2 + 2\zeta_P \omega_{NF} s + \omega_{NF}^2} \quad (9)$$

式中: ω_{NF} 为二质模型的谐振频率,称为陷波频率; ζ_Z 、 ζ_P 分别为结构滤波器的零点和极点阻尼系数。

由结构滤波器公式(9)可知,在陷波频率 ω_{NF} 固定时,阻尼系数比值 ζ_Z/ζ_P 影响结构滤波器的幅值和相位特性。为了分析 ζ_Z 、 ζ_P 对结构滤波频率特性的影响,对 ω_{NF} 作如下归一化处理:令 $\omega_{NF}=1 \text{ rad/s}$ 。保持 $\zeta_P=1$ 不变,假设零点阻尼系数 $\zeta_Z=0.5$ 、 0.25 、 0.1 时的结构滤波器频率特性曲线如图6所示。从图中可以看出,在 $\omega=\omega_{NF}$ 频率处,滤波器幅值特性的深度最大,当 $\zeta_Z/\zeta_P=0.1$ 时,滤波器幅值特性的深度达到最大值 -20 dB ;滤波器的深度随着零点阻尼系数的增大而减小。 ζ_Z/ζ_P 比值决定了结构滤波器幅值深度的同时,复极点的阻尼系数决定了滤波器的宽度,在保持不变时,幅值特性深度为 -20 dB ,结构滤波器幅值特性的宽度随着 ζ_P 的变化曲线如图7所示。从图中可以看出,滤波器的宽度随着 ζ_P 的增大而增加。因此,在设计结构滤波器时只需调整比值 ζ_Z/ζ_P 和 ζ_P ,即可获得所需结构滤波器的频率特性。

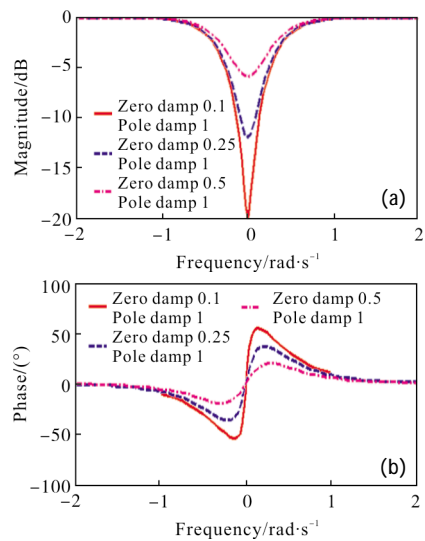


图 6 $\zeta_P=1$, ζ_Z 变化时结构滤波器频率特性

Fig.6 Frequency feature of the structural filter with variable ζ_Z and $\zeta_P=1$

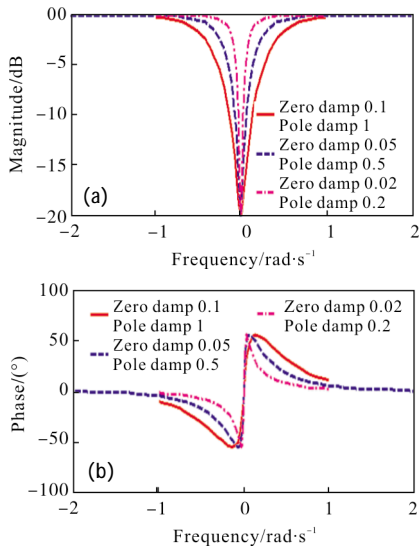


图 7 ζ_p/ζ_z 为常数时结构滤波器频率特性

Fig.7 Frequency feature of the structural filter with constant ζ_p/ζ_z

在望远镜控制系统中加入公式(9)所示的结构滤波器,控制系统框图如图 8 所示,系统包括速度控制器、结构滤波器、电流控制器以及望远镜结构模型。其中望远镜的结构模型包含了驱动电机和望远镜跟踪架结构的主要动态特性。为了分析结构滤波器对控制系统动态性能的改善效果,下面采用根轨迹法对如图 8 所示的控制系统进行分析。

采用根轨迹方法对某标准系统的开环传递函数进行分析。未加入滤波器时系统的根轨迹如图 9 所示,从图中可以看出,系统存在一对零极点,当控制器增益 $0 < K_p < 3.14$ 时系统是稳定的。在系统中加入结构滤波器的目的是消除谐振极点,增大控制系统增益。在进行滤波器设计时,需要满足 $\zeta_z = \zeta_p$,但是模型的极点阻尼系数 ζ_p 依赖于结构的粘滞系数 b_1 ,由

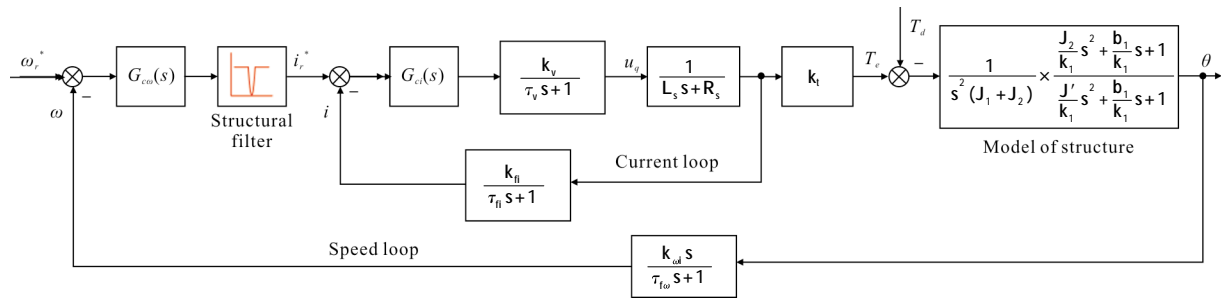


图 8 基于结构滤波器的望远镜闭环控制系统

Fig.8 Telescope closed-loop control system based on the structural filter

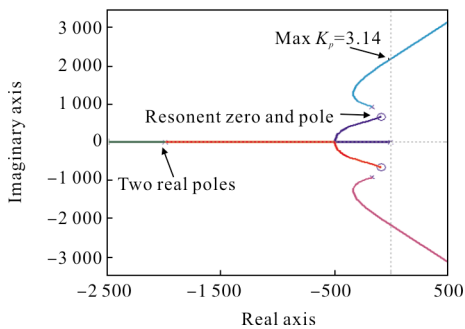


图 9 未加入结构滤波器前系统的根轨迹

Fig.9 Root locus of the system before structural filter added

于粘滞系数 b_1 随着机械位置、旋转速度以及温度而变化,实际应用中很难做到 $\zeta_z = \zeta_p$ 。假设存在偏差 $\Delta\zeta = \zeta_z - \zeta_p$,导致了 0.1 rad 的结构滤波器零点误差,得到如图 10 所示的加入结构滤波器后的系统根轨迹曲线。从图 10 中可以看出,在加入结构滤波器后系统的控制器增益由 3.14 增大到 9.07,因此,即使在设计结构滤波器时零点阻尼系数存在较小的偏差,

也不会影响结构滤波器的效果。虽然串入结构滤波器后开环增益增大到 9.07,加入结构滤波器后系统的开环增益和稳定性明显提高。为了进一步说明结构滤波器的滤波性能,在控制器增益 $K_p = 3.0$ 时,加入滤波器前后系统的阶跃响应曲线如图 11、12 所示。从图中可以看出,加入结构滤波器后系统的开环增益和稳定性明显提高。

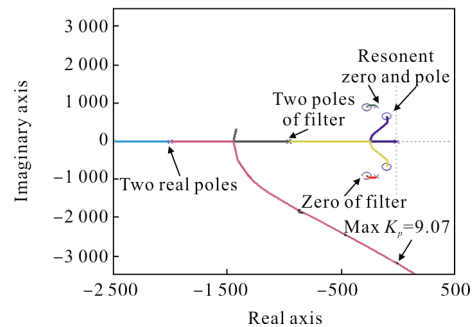


图 10 加入结构滤波器后系统的根轨迹

Fig.10 Root locus of the system after structural filter added

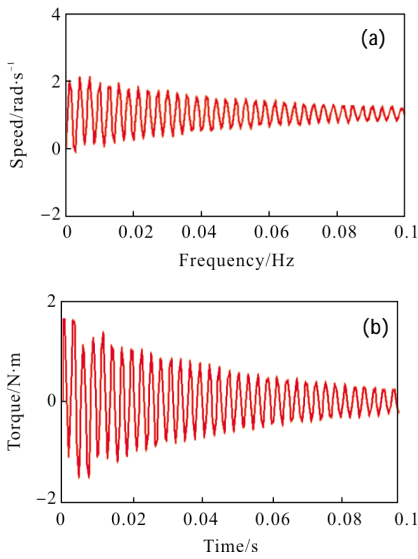


图 11 未加入结构滤波器 $K_p=3.0$ 时系统响应曲线

Fig.11 Step response curve with $K_p=3.0$ when the structural filter is not added

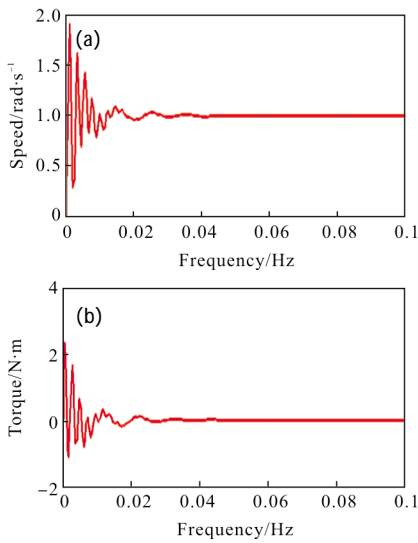


图 12 加入结构滤波器 $K_p=3.0$ 时系统

Fig.12 Step response curve with $K_p=3.0$ when the structural filter is added

为了验证结构滤波器在实际控制系统中的效果,对某望远镜的方位轴速度闭环回路进行了测试。通过测试结果可以看出:系统在 10 Hz 和 53.7 Hz 的频率处有较大的谐振峰值,其时域和频域曲线分别如图 13 和 14 中的红色曲线所示,这两处的谐振严重影响了控制系统的闭环稳定性。首先,在 10 Hz 频率处加入结构滤波器,控制系统的时域和频域曲线分别如图 13 和 14 中的蓝色曲线所示。通过比较红色曲线可以看出:系统在 10 Hz 处的谐振峰值得

到了明显抑制;同样的方法,在 10 Hz 和 53.7 Hz 频率处同时设计结构滤波器,控制系统的时域和频域曲线分别如图 13 和 14 中的粉色曲线所示。通过对比红色曲线可以看出:系统在 10 Hz 和 53.7 Hz 处的谐振峰值都得到了明显抑制。上述实验结果表明:结构滤波器在抑制系统主要谐振峰值的同时,也为控制系统闭环带宽的增大提供了空间;但在控制系统闭环带宽时,还需要考虑结构滤波器引起的系统相位滞后问题,否则会导致闭环系统的振荡。

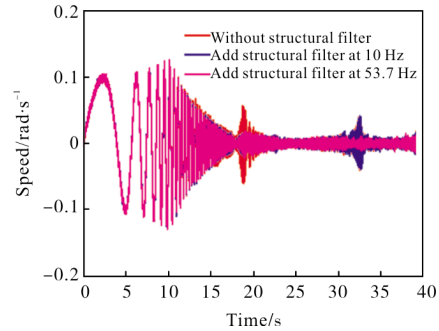


图 13 实测系统中加入结构滤波器后的时域响应

Fig.13 Tested time domain response when the structural filter is added

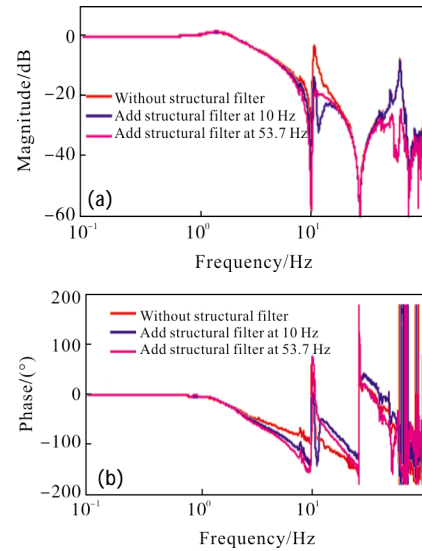


图 14 实测系统中加入结构滤波器后的频域响应

Fig.14 Tested frequency domain response when the structural filter is added

以上介绍了结构滤波的原理以及在控制系统中的应用效果,但是实际的大口径望远镜控制系统,特别是方位轴的转动惯量随着俯仰轴角度变化而变化,因此,方位轴的谐振频率的相位和幅值在目标观测过程中会发生偏移,如果此时控制系统采用固定

形式的结构滤波器可能会导致系统的振荡^[13]。参考文献[14-15]等介绍了自适应结构滤波器,这种形式的滤波器能够根据系统谐振自动调节其零极点,但是对于望远镜这种可靠性要求很高的控制系统,自适应结构滤波器显然难以得到实际应用。

3 加速度反馈控制对系统闭环带宽的影响

常规的望远镜控制系统如图 15 所示,主要包括位置回路和速度回路, C_p 为位置控制器, C_v 为速度控制器, G_a 为控制对象传递函数, H_a 为扰动力矩传

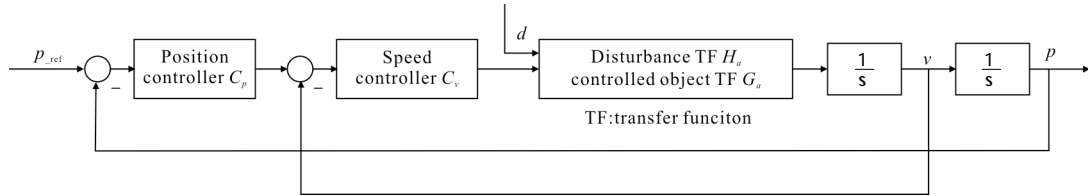


图 15 常规的望远镜控制系统框图

Fig.15 Block diagram of general telescope control system

递函数,下面对该控制系统进行抗扰动性能分析。

PSD 表达式为:

系统的角速度表达式为:

$$P_{PSD} = |H_p S_v S_p|^2 d_{PSD} \quad (13)$$

$$v = \frac{H_v}{1+C_v G_v} d + \frac{C_v G_v}{1+C_v G_v} v_{ref} \quad (10)$$

由公式(13)可以看出,望远镜位置跟踪精度由位置敏感度函数 S_p 和速度敏感度函数 S_v 决定。增大速度环和位置环带宽能够降低控制系统的扰动 PSD,因此,控制系统的闭环带宽对提高望远镜的跟踪精度和抗扰动性能起着决定性作用。如图 15 所示的望远镜串级控制系统,速度内环的动态响应速度大于位置外环,因此,系统角位置的 PSD 主要取决于速度敏感度函数 S_v ,也就是主要由速度回路带宽决定。

式中: $H_v = H_a/s$; $G_v = G_a/s$ 。

假设 $T_v = \frac{C_v G_v}{1+C_v G_v}$, $S_v = \frac{1}{1+C_v G_v}$,对公式(10)进行积分得到望远镜的角位置表达式为:

基于加速度反馈控制的望远镜控制系统框图如图 16 所示,该系统在常规控制系统的基础上加入了加速度反馈控制回路, C_a 为加速度控制器,下面对该

$$p = \frac{1}{s} S_v H_v d + \frac{1}{s} v_{ref} T_v \quad (11)$$

将 $v_{ref} = C_p(r-p)$ 代入公式(11)可得:

$$p = \frac{1}{s} S_v H_v d + \frac{1}{s} C_p(r-p) T_v = H_p S_v S_p d + \frac{1}{s} S_p C_p T_v r \quad (12)$$

式中: $S_p = \frac{1}{1+C_p T_v/s}$; $H_p = H_v/s$ 。因此,系统角位置的

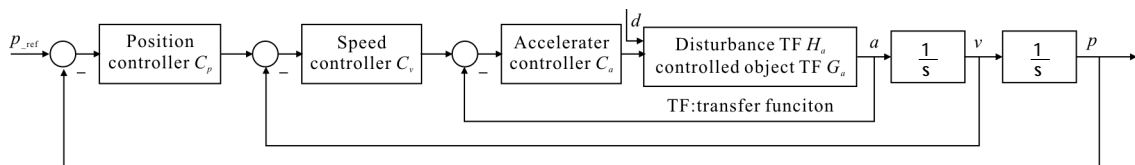


图 16 基于加速度反馈控制的望远镜控制系统框图

Fig.16 Block diagram of telescope control system with acceleration-feedback control

控制系统进行抗扰动性能分析。

系统的加速度表示为:

$$v = \frac{H_v d}{1+C_a G_a} + C_v(v_{ref} - v) \frac{1}{s} \frac{C_a G_a}{1+C_a G_a} = S_a \bar{S}_v H_v d + v_{ref} \bar{T}_v \quad (16)$$

$$a = \frac{H_a}{1+C_a G_a} d + \frac{C_a G_a}{1+C_a G_a} a_{ref} \quad (14)$$

$$\text{式中: } H_v = \frac{1}{s} H_a; S_a = \frac{1}{1+C_a G_a}; \bar{S}_v = \frac{1}{1+C_v G_v}; \bar{T}_v = \frac{C_v G_v}{1+C_v G_v}。$$

对加速度进行积分可得系统的速度表达式为:

系统的角位置表达式为:

$$v = \frac{1}{s} \frac{H_a}{1+C_a G_a} d + \frac{1}{s} \frac{C_a G_a}{1+C_a G_a} a_{ref} \quad (15)$$

$$p = H_p S_a \bar{S}_v S_p d + S_p C_p \frac{1}{s} \bar{T}_v p_{ref} \quad (17)$$

将 $a_{ref} = C_v(v_{ref} - v)$ 代入公式(15)可得:

因此,系统角位置的 PSD 表达式为:

$$P_{PSD} = |H_p S_a \bar{S}_v S_p|^2 d_{PSD} \quad (18)$$

式中： $S_p = \frac{1}{1 + C_p \bar{T}_v/s}$ 。

比较公式(13)和公式(18)可以看出,敏感度函数 S_a 的加入减小了系统的位置 PSD, 提高了系统的模态阻尼, 因此, 基于加速度反馈控制的方法在提高望远镜控制系统的抗风载扰动能力的同时, 提高了系统的闭环控制带宽。

对某望远镜的方位轴的速度开环频率特性测试结果如图 17 所示。从图中可以看出: 在加速度反馈控制加入后, 系统的频率特性曲线发生了向下偏移, 高频动态特性的幅值得到了有效抑制, 这为速度回路开环增益的提高提供了条件。因此, 加速度反馈控制的加入提高了系统的开环增益, 进而提高了系统的控制带宽。望远镜控制系统的抗扰动性能曲线如图 18 所示。从图中可以看出, 加速度反馈控制在低频段有效地抑制了扰动, 提高了系统的跟踪精度。

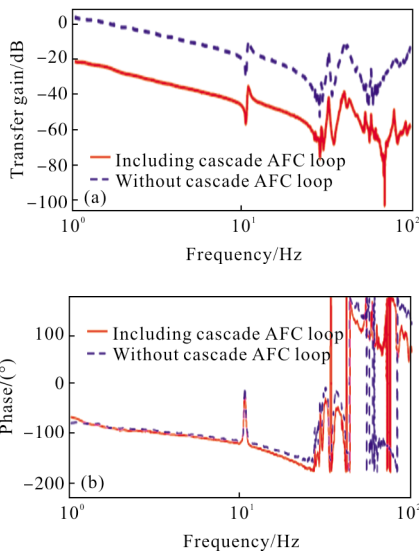


图 17 加速度反馈加入前后系统的开环特性

Fig.17 Open-loop frequency feature of the system before and after acceleration feedback is added

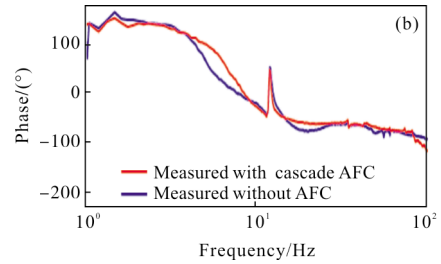
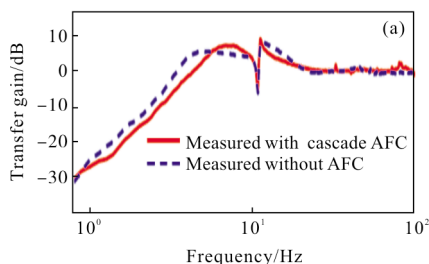


图 18 加速度反馈加入前系统的抗扰动特性

Fig.18 Disturbance rejection feature of the system before and after acceleration feedback is added

通过上述数据分析可以看出: 相比于结构滤波器方法, 加速度反馈控制方法不会引起系统相位滞后, 在提高望远镜控制带宽的同时也增强了系统的抗风载扰动性能, 因此基于加速度反馈控制的方法是一种相对最优方案。但是, 在应用加速度反馈控制技术时需要考虑如下因素: 为了达到更好的控制效果, 需要选择灵敏度强的加速度计, 这会增加设计成本; 此外, 在加速度计安装时需要隔离由于望远镜镜面结构振动引入的干扰信号。

4 结论

文中首先在大口径望远镜弹簧质量模型的基础上, 分析了影响跟踪架结构谐振的因素; 为了解决结构谐振引起的控制系统振荡问题, 详细介绍了结构滤波器方法及其在望远镜控制系统中的应用; 为了克服结构滤波器不具有自适应性的缺点, 介绍了基于加速度反馈控制的方法, 通过分析和实验看出基于加速度反馈控制的方法是一种相对最优方案。文中介绍的提高控制系统带宽的方法对大口径望远镜的设计具有一定的参考价值。

参考文献:

[1] Deng Yongting, Li Hongwen, Wang Jianli. Overview of AC servo control system for the large telescope [J]. Chinese Optics, 2015, 8(6): 895-908. (in Chinese)
邓永停, 李洪文, 王建立. 大型望远镜交流伺服控制系统综述[J]. 中国光学, 2015, 8(6): 895-908.

[2] Deng Yongting, Li Hongwen, Wang Jianli, et al. Design of telescope servo system based on DSP and FPGA[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(3): 908-914. (in Chinese)

- 邓永停, 李洪文, 王建立, 等. 基于 DSP 和 FPGA 的望远镜伺服控制系统设计 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(3): 908-914.
- [3] Xia Peipei, Deng Yongting, Wang Zhiqian, et al. Model identification for K mirror turntable of 2 m telescope [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(3): 0318001. (in Chinese)
夏培培, 邓永停, 王志乾, 等. 2 m 望远镜消旋 K 镜转台的模型辨识[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(3): 0318001.
- [4] Erm T, Gutierrez P. Integration and tuning of the VLT drive systems [C]//SPIE Astronomical Telescopes Instrumentation. International Society for Optics and Photonics, 2000: 490-499.
- [5] Suárez M, Rosich J, Ortega J, et al. The GTC main axes servos and control system [C]//SPIE Astronomical Telescopes Instrumentation. International Society for Optics and Photonics, 2008, 7019: 70190J.
- [6] Deng Yongting, Li Hongwen, Wang Jianli, et al. Main axes AC servo control system for 2 m telescope [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(1): 163-171. (in Chinese)
邓永停, 李洪文, 王建立, 等. 2 m 望远镜主轴交流伺服控制系统设计[J]. 光学 精密工程, 2017, 25(1): 163-171.
- [7] Andersen T, Enmark A. Integrated Modeling of Telescopes [M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2011.
- [8] Deng Yongting, Li Hongwen, Wang Jianli, et al. Application of structural filter to principal axis system of telescope [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(4): 900-909. (in Chinese)
邓永停, 李洪文, 王建立, 等. 结构滤波器在望远镜主轴控制系统中的应用[J]. 光学 精密工程, 2017, 25(4): 900-909.
- [9] Deng Yongting. Research on AC control system for the 4 m scale telescope main axis [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015. (in Chinese)
邓永停. 4 m 级望远镜主轴交流伺服控制系统研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
- [10] Anderson T, Zurbuchen R. Acceleration feedback applied to a 3.6 m telescope servo system [R]. US: European Southern Laboratory Telescope Project Division, 1976.
- [11] Higginson A M, Sanders S, Walllett C. Estimation acceleration feedback applied to a telescope servo system [J]. *Mechatronics*, 1991, 1(4): 509-523.
- [12] Koehler B, Kraus M, Moresmau J M, et al. The VLTI auxiliary telescopes: measured performances [C]//SPIE, Astronomical Telescopes and Instrumentation, International Society for Optics and Photonics, 2006, 6268: 626841.
- [13] Martin Ravensbergen. Main axes servo systems of the VLT [C]//SPIE, Symposium on Astronomical Telescopes and Instrumentation for the 21st Century, International Society for Optics and Photonics, 1994: 997-1005.
- [14] Lee D H, Lee J H, Ahn J W. Mechanical vibration reduction control of two-mass permanent magnet synchronous motor using adaptive notch filter with fast Fourier transform analysis [J]. *Electric Power Applications Iet*, 2012, 6(7): 455-461.
- [15] Yang Shengming, Wang Shichuan. The detection of resonance frequency in motion control systems [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2014, 5(5): 3434-3427.