基于自适应自抗扰控制技术的 2 m 望远镜 K 镜的速度控制研究

夏培培[1,2],王志乾[1],李洪文[1],邓永停[1],王显军[1]

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学,北京 100049)

摘 要:为了满足 2 m 望远镜系统中消旋 K 镜伺服系统的速度控制性能,提出一种基于控制律参数自适应的自抗扰控制新方法。首先,基于速度回路被控对象,设计了二阶线性扩张状态观测器,以实现对扰动的实时观测;然后,为了提高速度环动态和稳态性能,采用回归分析方法,设计了控制律参数基于输入速度变化而自适应调整的比例控制器;最后,搭建了消旋 K 镜伺服控制实验系统,在速度阶跃信号激励下开展实验研究。结果显示:与传统 PI 和自抗扰控制器相比,系统以 0.001 (°)/s 速度运行时,稳定时间从 7.3 s、3.2 s 减少至 0.9 s;以 10 (°)/s 速度运行时,系统超调量从 8%、62%降低至无超调;在中低频段的扰动抑制能力最大提高了 23 dB,性能得到了提高,可满足 K 镜伺服系统高精度的速度控制性能要求。

关键词:望远镜 K 镜; 速度控制; 自抗扰控制; 自适应控制器律参数
中图分类号:TP273 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201847.0718006

Speed control for K mirror of 2 m telescope based on adaptive active disturbance rejection-controller

Xia Peipei[1,2], Wang Zhiqian[1], Li Hongwen[1], Deng Yongting[1], Wang Xianjun[1]

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to meet the requirements of velocity control performance of servo system for K mirror in the 2 m telescope system, a new active disturbance rejection-controller (ADRC) based on adaptive control law parameter was proposed. Firstly, the second-order linear extended state observer based on first-order velocity model was designed; And then, in order to improve the dynamic and steady-state performance of speed-loop, proportion controller′s parameter based on regression analysis method was designed into a function and it will be automatically adjusted with the variation of input speed. Finally, experiment system based on K mirror servo control was set up, the experiment was performed under the excitation of step signal. Actual results show that compared with the PI and ADRC controller, the regulation time for 0.001 (°)/s step response is reduced from 7.3 s, 3.2 s to 0.9 s. The overshoot for 10 (°)/s step response is reduced from 8%, 62% to 0; The best disturbance inhibition ability is increased 23 dB among the low and middle frequency band, satisfying the high accuracy speed control performance requirements of K mirror servo system.

Key words: K mirror of telescope; speed control; active disturbance rejection-controller; adaptive control law parameter

收稿日期:2018-02-10; **修订日期**:2018-03-20
基金项目:国家自然科学基金(11603024)
作者简介:夏培培(1986-),女,博士生,主要从事望远镜精密跟踪伺服控制技术方面的研究。Email:peiwaer07@163.com
导师简介:王志乾(1969-),男,研究员,主要从事光电测量、数字信号处理方面的研究。Email:zhiqian_wang@sina.com

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

0 引 言

地基大口径望远镜应用于天文观测、监视定轨及成像识别等领域[1]。K 镜作为望远镜系统中的一个子系统,主要用于补偿由望远镜俯仰、方位轴协调联动带来的视场转动(即像旋)[2],以便实现对目标的实时识别和图像的处理。为实现实时目标识别及保证消旋后图像的质量,要求 K 镜伺服系统速度控制响应快、超调量小、稳态精度高、低速平稳运行。但是,系统在工作期间,受摩擦、齿槽力矩波动、系统参数摄动等因素的影响,很难满足以上高性能的控制要求。因此,在系统硬件确定的条件下,通过改进控制算法,研究如何有效地提高 K 镜伺服系统的速度控制性能至关重要。

为提高伺服系统的速度控制性能,国内外学者对控制方法进行了广泛而深入的研究。主要的控制方法有以下两种:比例积分微分(Proportion Integration Differentiation,PID)控制方法和现代控制方法。目前较多的控制算法采用 PID 控制及在此基础上衍生的新的控制算法,如李洪文[3]在速度回路提出的基于内模的 PI 控制器,通过滤波器参数来设计 PI 控制器的比例系数和积分常数,实现了高速运行无超调,低速平稳运行,但是内模控制器的控制效果依赖于被控对象的模型和模型逆的匹配程度。张斌等[4]在速度回路提出了变结构 PID 控制,将系统控制器参数设计为随控制误差变化而变化的时变参数,改善了系统的动态和稳态特性,但是系统待调试参数较多(7 个),不易于工程实现。随着现代控制技术的发展,现代控制理论可以有效提高伺服系统的速度性能。如宋彦[5]等在速度回路设计了镇定状态观测器,测速精度高,相角滞后小,但是这种方法需要系统精确的数学模型,设计过程比较复杂。目前这些方法或需要系统精确的数学模型,或待调试参数多,或设计难度大,不易于在实际工程中得到推广和应用。

相比之下,由韩京清教授提出的自抗扰控制器(Active Disturbance Rejection Control, ADRC)[6-7]不依赖于对象精确的数学模型,能够从控制对象的输入和输出信号中估计出系统所受到的总扰动,并将其前馈补偿至控制器的输出,生成带有扰动补偿的控制量,从结构上实现了“主动”抗扰,为提高伺服系统控制性能提供了新思路[8-11],该控制方式也已经被成功地应用于光电跟踪的伺服控制领域。如参考文献[12]在某航空光电稳定平台中引入了自抗扰控制技术,设计了基于扰动频率自适应的扩张状态观测器(Extended State Observer, ESO),解决了传统扩张观测器对二阶及二阶以上系统观测存在明显相角滞后的影响,但是它不适用于 K 镜伺服系统。参考文献[13]在某光电系统中采用了二阶非线性自抗扰控制技术,实现了对快速运动目标的高精度跟踪,但是主要侧重于对位置环的研究。

传统 ADRC 的参数在整个控制过程中是固定的,对于望远镜 K 镜这种存在非线性、干扰特性变化大的控制对象,应用传统 ADRC 实施控制难以达到很好的控制效果。为了满足望远镜系统对 K 镜速度控制的要求,文中提出一种控制律参数自适应的自抗扰控制方法,它能够根据系统输入速度的变化而自适应调整控制律的参数,在自抗扰控制提高系统扰动抑制能力的同时,改善了系统的动态和稳态性能。该方法不依赖被控对象精确的数学模型,只需调试两个参数,设计简单易于工程实现。为验证其有效性,进行了性能对比实验研究。结果表明:该方法能够最大限度地抑制扰动,在提高跟踪精度的基础上,具有很好的动态性能,满足了 K 镜伺服系统对速度控制的高要求。

1 系统设计要求

目前应用的消旋方法主要有三种:电子消旋、物理消旋和光学消旋。因光学消旋具有“非接触”、“实时”、“全场”的特点,因此文中望远镜系统采用光学 K 镜消旋装置,其利用直流力矩电机直接驱动 K 镜组件以入射光旋转速度的 1/2 转动,进而消除或减小像面图像的旋转,实现实时目标识别并保证消旋后图像的质量。对于望远镜方位轴最大角加速度 5 (°)/s^2,俯仰轴最大角加速度 3 (°)/s^2,K 镜最大工作速度 10 (°)/s,望远镜观测 CCD 相机像素数 1 024×1 024,相机长曝光时间 t=500 ms 的光电跟踪系统,要求 K 镜系统的速度跟踪精度为 3.6 (″)/s,

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

稳定跟踪的动态过渡时间<2 s，在速度工作范围内的超调量<1%。

2 自抗扰控制器设计

自抗扰控制技术是一种基于“主动”抗扰的控制技术，它将所有扰动对系统的影响统称为“总扰动”，并将其扩张为一个新的状态，然后通过 ESO 对该扰动进行实时估计，并将其估计值前馈至控制器输出，从而实现主动抑制扰动。基于自抗扰控制器主动抑制扰动的优点，文中将自抗扰控制算法应用于消旋 K 镜伺服系统，实现 K 镜伺服系统扰动的前馈补偿，以提高系统的抗扰能力。同时，考虑到 K 镜伺服控制系统在不同运动状态(速度)下，系统所受摩擦、齿槽力矩波动等干扰特性变化较大，因此在自抗扰控制算法的基础上，将速度回路的比例控制器参数设计为一个以系统输入速度为自变量的函数，随着系统输入速度的变化而自动调整，在低速运行时，适当放大控制律参数，以提高系统的补偿能力，获得较快的响应能力；在中高速运行时，适当减小控制律参数，以避免控制器饱和引起的较大的速度超调，从而进一步改善系统的动态性能。文中提出的控制算法对应的控制系统原理框图如图 1 所示。

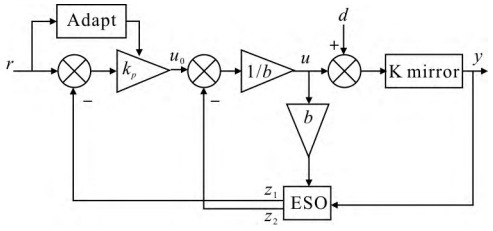

图 1 控制律参数自适应的自抗扰控制器的工作原理

Fig.1 Principle of ADRC based on adaptive control law parameter

工程上，K 镜伺服系统主要采用直流力矩电机直接驱动，在忽略机械谐振、高频小惯性环节和内外扰动的前提下，直流力矩电机数学模型可简化为：

$$G_p(s)=\frac{k}{(T_m s+1)(T_e s+1)} \tag{1}$$

式中：T_m 为机电时间常数；T_e 为电气时间常数。消旋 K 镜属于大惯量系统，机械时间常数远大于电气时间常数，因此可忽略电气时间常数的影响，公式(1)可简化为：

$$G_p(s)=\frac{k}{(T_m s+1)} \tag{2}$$

将公式(2)写成状态方程的形式：

$$\begin{cases}\dot{x}_1=bu+f(t,y(t),d(t))\\ y=x_1\end{cases} \tag{3}$$

式中：d(t)为系统的外部扰动；$f(t,y(t),d(t))=d(t)-\frac{1}{T_m}y(t)$为系统受到的内扰和外扰的“综合作用”；$b=\frac{k}{T_m}$为控制量 u 到加速度$\dot{y}$的变换系数。令 $x_2=f$，并将 f 作为一个被扩张的状态，则公式(3)可改写为：

$$\begin{cases}\dot{x}_1=bu+f(t,y(t),d(t))\\ \dot{x}_1=\dot{f}\\ y=x_1\end{cases} \tag{4}$$

设计二阶 ESO 对系统的总扰动 f 进行实时估计，实现 $z_2\to f$，具体形式如公式(5)所示：

$$\begin{cases}\dot{z}_1=z_2+L_1(y-z_1)+bu\\ \dot{z}_2=L_2(y-z_1)\end{cases} \tag{5}$$

式中：z_1 为 ESO 对系统输出速度 y 的估计；z_2 为 ESO 对系统总扰动 f 的估计；L_1，L_2 为观测器参数。利用基于带宽概念[14]的设计方法来确定 L_1 和 L_2，相应的有 $L_1=2w_0$，$L_2=w_0^2$。

根据自抗扰控制思想[7]，控制量的输出为：

$$u=\frac{u_0-z_2}{b} \tag{6}$$

将公式(6)代入公式(3)得到表达式：

$$\dot{y}=(f-z_2)+u_0\approx u_0 \tag{7}$$

由此可知：只要 ESO 的设计合理，使 $z_2\to f$，就可以前馈补偿总扰动 f 对系统的影响，进而将带有扰动的非线性系统校正为简单的“纯积分”系统。

3 自适应控制器设计

传统的 PI 控制器引入积分控制，目的是为了消除阶跃输入和常值扰动产生的稳态误差[7]，而由

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

公式(7)知,经过 ESO 校正后的系统被转化为纯积分结构,因此在控制器 u_0 的设计中就不必为消除阶跃输入和常值扰动产生的稳态误差而采用“积分器”,以避免积分器带来的反应迟钝,相角滞后等问题[15],从而将控制器设计为简单的比例控制器[16-17],即:

$$u_0=k_p(r-z_1) \tag{8}$$

式中:k_p 为控制律参数;r 为速度参考值。

由公式(7~8)可得速度闭环传递函数为:

$$G_{\text{close}}(s)=\frac{y(s)}{r(s)}=\frac{k_p}{s+k_p} \tag{9}$$

当公式(8)中的 k_p 固定时,K 镜系统在一定速度范围内,通过 ESO 和比例控制器的作用,可实时补偿系统中的扰动,取得较好的控制效果。但是,当 K 镜在超低速(0.001°/s)运行时,ESO 虽然能对 z_2 进行估计,但是由于死区的存在,当固定参数比例控制器输出码值小于死区阈值时,K 镜转台不能及时产生动态响应,对静摩擦力矩扰动不能实现实时补偿,产生动态滞后;在大阶跃信号(10°/s)作用下,固定参数比例控制器输出饱和,导致较大超调,进入稳定状态需要较长时间且稳态误差大。为了满足 K 镜转台的速度控制性能要求,需要解决“控制小死区”和“控制大超调”的问题。

针对这些问题,文中将速度回路的比例控制器参数 k_p 设计为一个以系统输入速度为自变量的函数,随着系统输入速度的变化而自动调整。当速度输入信号减小时,k_p 逐渐增大,以增强补偿作用;当速度输入信号增大时,k_p 逐渐减小,以防止产生振荡和控制器饱和,有利于减小超调量、缩短调整时间。设计步骤如下:

(1) 搭建速度闭环的控制实验系统,给定速度测试点 $v_1,v_2,\cdots,v_n$,通过实验得到不同速度给定下控制性能达到最佳状态所对应的控制律参数 k_{p1}, $k_{p2},\cdots,k_{pn}$;

(2) 根据各个速度测试点相应的最优控制律参数,采用回归分析方法[18],以离差平方和最小为原则,设计出 k_p 和速度给定值 r (即速度测试点)之间的自适应律表达式 $k_p=f(r)$,进而实现对系统扰动最大限度的抑制,提高系统的动态性能。与 r_i 对应的离散数据为 k_{pi},拟合函数是 $f(r)$,则拟合精确度的量度可以表示为:

$$d(r_i)=|k_{pi}-f(r_i)| \tag{10}$$

当离散数据为 n 组时,把公式(11)值最小时所对应的拟合函数作为控制律参数自适应的函数模型:

$$E=\sum_{i=1}^{n} d^2(r_i) \tag{11}$$

4 实验研究和讨论

为验证上述控制方案的有效性,建立了 K 镜伺服控制实验系统,进行了基于 PI 控制、ADRC 控制、ADRC+Adapt(控制律参数自适应)控制三种方法的性能对比实验。实验平台由基于直流力矩电机直接驱动的 K 镜转台、控制器、驱动器、32 位绝对式编码器等组成。电机参数如下:电机轴上总惯量 $J=9.7\times10^{-2}$ kg·m²,力矩常数 $K_t=7.33$ N·m/A,电机反电动势系数 $J=9.7\times10^{-2}$ kg·m²,电枢电感 $L=0.021$ H,电枢回路总电阻 $R=8.5$ Ω。速度环采样频率为 500 Hz。实验系统实物图如图 2 所示。

图 2 实验系统实物图

Fig.2 Physical map of experiment system

考虑到实际的 K 镜转台是由直流力矩电机与负载耦合在一起,因此不能根据电机参数直接获取系统传递函数,经系统辨识得到电压与速度之间的传递函数:

$$G_p(s)=\frac{0.030\ 7}{0.55s+1} \tag{12}$$

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

4.1 控制律参数自适应律实验

表 1 给出了在速度测试点下，最优控制律参数的实验结果。从表中数据可以看出，对于不同的速度给定值，系统在不同的 k_p 下取得了最佳的控制性能。

表1 速度测试点最优控制律参数实验结果

Tab.1 Experiment result of optimal control-law parameters at speed testing point

Speed reference/ (°)·s^{-1}	Optimal value of k_p	Speed reference/ (°)·s^{-1}	Optimal value of k_p
0.005	249	1	95
0.01	170	2	90
0.05	134	5	61
0.5	110	8	48

基于表 1 的实验数据，采用第 3 节的方法，建立的控制律参数 k_p 和速度参考值 r 之间的函数模型为：

$$k_p=\begin{cases}249 & |r|\leqslant 0.005\\ \dfrac{629.2\mathrm{abs}(r)+2.473}{r^2+5.082\mathrm{abs}(r)-0.006\ 47} & |r|>0.005\end{cases} \tag{13}$$

4.2 自适应比例控制器对“控制小死区”和“控制大超调”的补偿实验

在设计过程中，通过控制律参数自适应的比例控制器，解决“控制小死区”和“控制大超调”的问题。图 3 为系统在 0.001 (°)/s 的阶跃信号作用下，ADRC 和 ADRC+Adapt 两种控制器输出码值的结果。从图中可以看出，ADRC 控制器在开始 3.2 s 内的输出码值都小于死区阈值 (通过实验测试，K 镜转台的死区阈值为 D=312)，K 镜转台没有动态响应能力，不能对扰动进行实时的补偿。而 ADRC+Adapt 控制器能够基于参考速度 0.001 (°)/s 适当调大控制律参数，使控制器在 0.9 s 后的输出码值大于死区阈值，从而使系统能够对扰动进行实时的补偿。

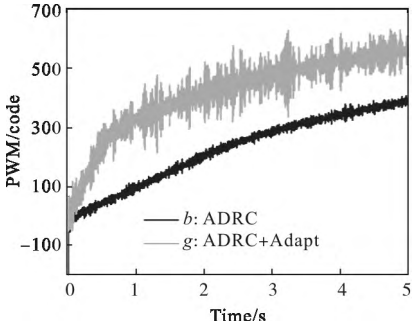

图 3 0.001 (°)/s 时的控制器输出码值

Fig.3 Code value of controller output at 0.001 (°)/s

图 4 为系统在 10 (°)/s 的速度阶跃信号作用下，三种控制器输出码值的结果。从图中可以看出，当速度给定值较大时，PI 和 ADRC 两种控制器输出码值产生饱和，导致系统出现超调，而 ADRC+Adapt 控制器能够基于速度参考值 10 (°)/s 适当减小控制律参数，进而使系统在 0.1 s 后无超调地进入稳态。

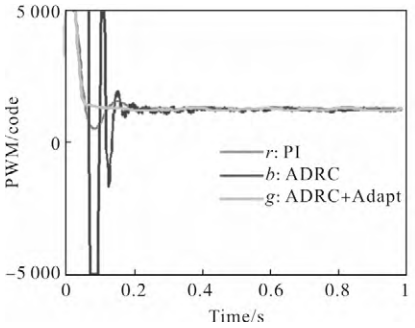

图 4 10 (°)/s 时的控制器输出码值

Fig.4 Code value of controller output at 10 (°)/s

4.3 实验对比验证

为了说明 ADRC+Adapt 控制方法的有效性，对 PI，ADRC 和 ADRC+Adapt 三种方法的控制性能进行了实验对比。为了便于对比，选定三组参数使得三种控制器作用下系统的闭环带宽相当，系统的闭环 Bode 图如图 5 所示，从图中可以看出三种控制器作用下的闭环系统，具有相当的−3 dB 带宽，它们分别是 13.6、13.7、13.8 Hz。

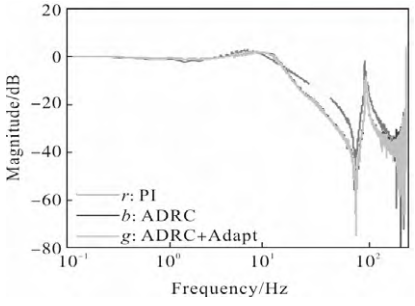

图 5 系统闭环Bode 图

Fig.5 Curve of the close-loop Bode

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

实验中设置速度环的PI 控制器参数为:比例增益系数 k_p=0.05,积分常数 k_i=0.005;ADRC 控制器参数为:w_0=60,k_p=96;ADRC+Adapt 控制器参数为:w_0=60,k_p= $f(r)$。

图 6 为系统在 0.001 (°)/s 的速度阶跃信号作用下输出的位置曲线。从图中可以看出,三种控制方法低速平稳运行达到 0.001 (°)/s,系统从静止到稳定运行,PI 控制器用时 7.3 s,ADRC 控制器用时 3.2 s,都不能满足 K 镜系统对速度控制的动态过渡时间要求<2 s,而 ADRC+Adapt 控制器用时 0.9 s,达到了系统动态响应快的要求。因此,文中提出的方法能够解决“控制小死区”的问题,满足了 K 镜系统对动态过渡时间的要求。

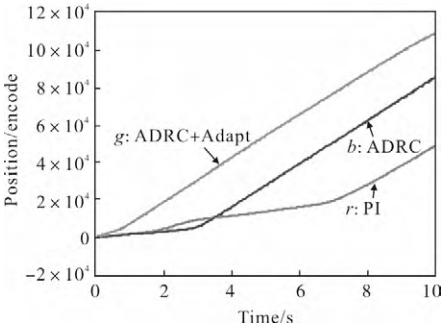

图 6 0.001 (°)/s 时的位置曲线

Fig.6 Curve of position at 0.001 (°)/s

图 7 为系统在 6 (°)/s 时的速度阶跃响应曲线(图 7(a))和速度稳态误差曲线(图 7(b)),从图 7(a)可以看出,PI 控制器的超调量为 16.7%, 进入稳态用时 0.22 s;ADRC 控制器无超调, 进入稳态用时 0.19 s;而 ADRC+Adapt 控制器无超调,进入稳态用时 0.08 s, 由此说明文中提出的方法提高了系统的动态过渡品质。从图 7(b)可以看出,ADRC 和ADRC+Adapt 的稳态误差相对于 PI 较小,说明自抗扰控制对系统的 “总扰动” 进行了补偿, 对比于 ADRC, ADRC+Adapt 的速度稳态误差最小,进一步提高了系统的稳态精度。

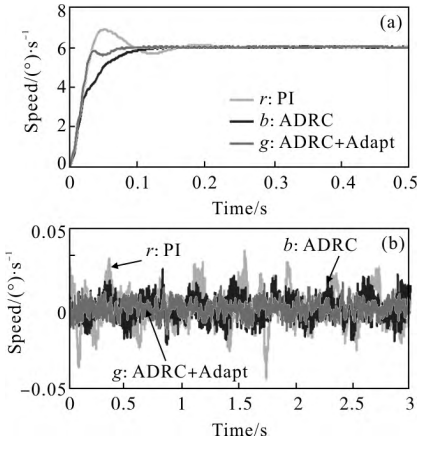

图 7 6 (°)/s 的速度阶跃响应曲线和速度稳态误差曲线

Fig.7 Curve of velocity and steady-error at 6 (°)/s

另外,6 (°)/s 为速度非测试点,其控制器参数通过自适应律求取,由图 7 的实验结果说明控制律参数自适应调整的正确性和有效性。

图 8 给出了系统在 10 (°)/s 时的速度阶跃响应曲线(图 8(a))和速度稳态误差曲线(图 8(b)),从图 8(a)可以看出,PI 控制器的超调量为 8%,ADRC 控制器的超调量为 62%, 而 ADRC+Adapt 控制器无超调,因此,文中提出的方法能够解决“控制大超调的问题”,满足了 K 镜系统对超调量<1%的要求。从图 8(b)可以看出,ADRC+Adapt 的速度稳态误差最小,进一步提高了系统的稳态精度。

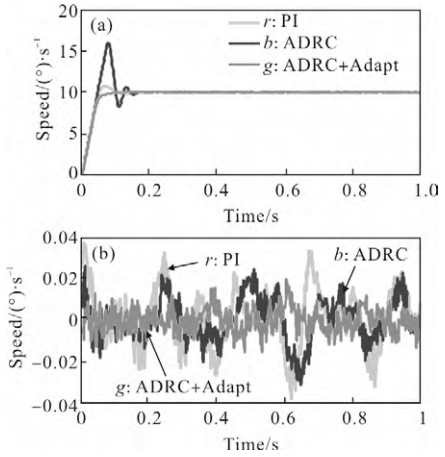

图 8 10 (°)/s 的速度阶跃响应曲线和速度稳态误差曲线

Fig.8 Curve of velocity and steady-error at 10 (°)/s

表 2 给出了以上三组速度作用下的动态响应时域指标及速度稳态误差均方根值的统计结果,由表 2 中数据可知:相对于 ADRC 控制方法,采用文中提出的方法,使系统在以 0.001(°)/s 运行时,调节时间缩短了 71%, 速度稳态误差 RMS 值降低了 31%;以 6 (°)/s 运行时,调节时间缩短了 57%,速度稳态误差 RMS 值降低了 40%; 以 10 (°)/s 运行时,调节时间缩短了 54%, 速度稳态误差 RMS 值降低了 49%,控制性能得到了提高,证明了自适应律的

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

正确性和有效性。

表2 速度阶跃响应实验结果

Tab.2 Experiment result of step response

Set-speed/(°)·s^{-1}	Control methods	Overshoot	Settling time/s	Steady-error RMS/(°)·s^{-1}
0.001	PI	No	7.3	0.001 8
	ADRC	No	3.2	0.001 6
	ADRC+Adapt	No	0.9	0.001 1
6	PI	16.7%	0.22	0.011 3
	ADRC	No	0.19	0.007 0
	ADRC+Adapt	No	0.08	0.004 2
10	PI	8%	0.25	0.012 3
	ADRC	62%	0.22	0.006 5
	ADRC+Adapt	No	0.1	0.003 3

为了评价系统的扰动抑制能力,在系统闭环带宽相当的条件下,测试了系统扰动传递函数的频率特性。绘制的系统扰动传递函数的 Bode 图,如图 9 所示,从图中的幅度特性可以看出,在高频段,三者基本重合,但在中低频段 (0.1~10 Hz),ADRC+Adapt 控制器对扰动的抑制能力要明显优于 PI 和 ADRC 控制器,最大提高了 23 dB,扰动抑制能力显著增强。

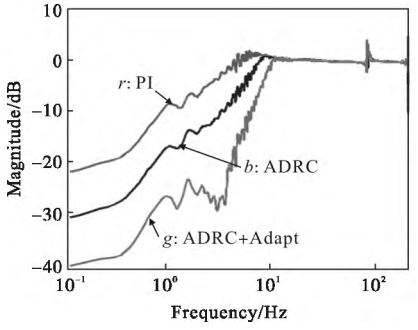

图 9 系统扰动抑制传递函数的 Bode 图

Fig.9 Bode curve of the transfer function for disturbance rejection

5 结 论

文中针对某 2 m 望远镜系统中消旋 K 镜的速度控制性能要求,提出了一种基于控制律参数自适应的自抗扰控制器。该控制器将固定参数的比例控制器替代为控制律参数随系统输入速度变化的自适应比例控制器,从而使系统满足了控制性能的要求。为了验证其性能,在 K 镜转台上与传统 PI 和 ADRC 控制器进行了性能对比实验,测试结果表明:ADRC+Adapt 控制器具有更快的速度响应特性、更好的速度平稳性、更小的超调量和更强的扰动抑制能力。相比 ADRC 控制器,ADRC+Adapt 控制器可以将 0.001 (°)/s 的速度阶跃响应时间缩短 71%,速度稳态误差 RMS 值降低 31%;将 10 (°)/s 的速度阶跃响应时间缩短 54%,速度稳态误差 RMS 值降低 49%,超调量降低至无超调。在中低频段的扰动抑制能力最大提高了 23 dB,可以满足 K 镜系统在速度工作范围内的控制要求。

参考文献:

[1] Zhang Jingxu. Overview of structure technologies of large aperture ground-based telescopes [J]. ***Chinese Optics***, 2012, 5(4): 327-336. (in Chinese)
张景旭. 地基大口径望远镜系统结构技术综述[J]. 中国光学, 2012, 5(4): 327-336.

[2] Wang Zhichen, Zhao Yongzhi, Zhou Chao. Design of K mirror for alt-az telescope [J]. ***Acta Photonica Sinica***, 2012, 41(7): 762-765. (in Chinese)
王志臣, 赵勇志, 周超. 地平式望远镜消旋 K 镜的设计[J]. 光子学报, 2012, 41(7): 762-765.

[3] Li Hongwen. Servo system of large telescope based on internal model PID control method [J]. ***Opt Precision Eng***, 2009, 17(2): 327-332. (in Chinese)
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, 17(2): 327-332.

[4] Zhang Bin, Li Hongwen, Guo Lihong, et al. Application of variable structure PID in velocity control for large telescope [J]. ***Opt Precision Eng***, 2010, 18(7): 1613-1619. (in Chinese)
张斌, 李洪文, 郭立红, 等. 变结构 PID 在大型望远镜速度控制中的应用[J]. 光学 精密工程, 2010, 18(7): 1613-1619.

[5] Song Yang, Gao Huibin, Zhang Shuimei. The analysis and design of low velocity estimation based on observer [C]// Proceedings of the IEEE, International Conference on Automation and Logistics, 2009.

[6] Han Jingqing. From PID to active disturbance rejection control [J]. ***IEEE Transaction on Industrial Electronics***, 2009, 56(3): 900-906.

[7] Han Jingqing. Active Disturbance Rejection Control

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Technique-the Technique for Estimating and Compensating the Uncertainties [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008. (in Chinese)
韩京清. 自抗扰控制技术-估计补偿不确定因素的控制技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.

[8] Du Bochao, Wu Shaopeng, Han Shouliang, et al. Application of linear active disturbance rejection controller for sensorless control of internal permanent-magnet synchronous motor [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(5): 3019-3027.

[9] Gu Jian, Ai Yong, Shan Xin, et al. Improvement of linear ESO and its application in space optical communication coarse tracking [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(3): 0322002. (in Chinese)
顾健, 艾勇, 单欣, 等. 线性扩张状态观测器的改进及在空间通信粗跟踪的应用 [J]. 红外与激光工程, 2016, 45(3): 0322002.

[10] Feng Yinan, Zhu Xiaoping, Zhou Zhou. Adaptive cascade active disturbance rejection controller for flexible flying wing UAV attitude control [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(5): 1594-1599. (in Chinese)
冯引安, 祝小平, 周洲. 自适应串级自抗扰弹性飞翼无人机姿态控制[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(5): 1594-1599.

[11] Yao Jiangyong, Deng Wenxiang. Active disturbance rejection adaptive control of hydraulic servo systems [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 99: 2694382.

[12] Li Xiantao, Zhang Bao, Sun Jinghui, et al. ADRC based on disturbance frequency adaptive of aerial photoelectrical stabilization platform [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(5): 1574-1581. (in Chinese)
李贤涛, 张葆, 孙敬辉, 等. 航空光电稳定平台扰动频率自适应的自抗扰控制 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(5): 1574-1581.

[13] Wang Wanting, Gao Jin, Jiang Zhenhua, et al. Study on photoelectric tracking system based on ADRC [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017,46(2): 0217003. (in Chinese)
王婉婷, 郭劲, 姜振华, 等. 光电跟踪自抗扰控制技术研究[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(2): 0217003.

[14] Gao Zhiqiang. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning [C]//Proceedings of the 2003 ACC, 2003: 4989-4996.

[15] Gao Zhiqiang. On the foundation of active disturbance rejection control [J]. *Control Theory & Applications*, 2013, 30(12): 1498-1510. (in Chinese)
高志强. 自抗扰控制思想探究[J]. 控制理论与应用, 2013, 30(12): 1498-1510.

[16] Li Jie, Qi Yuanhui, Xia Yuanqing, et al. On linear/nonlinear active disturbance rejection switching control [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2016, 46(2): 202-212. (in Chinese)
李杰, 齐晓慧, 夏元清, 等. 线性/非线性自抗扰切换控制方法研究[J]. 自动化学报, 2016, 42(2): 202-212.

[17] Li Jie, Xia Yuanqing, Qi Xiaohui, et al. On the necessity, scheme and basis of the linear-nonlinear switching in active disturbance rejection control [J]. *IEEE Transaction on Indusrial Electronics*, 2016, 99: 2611573.

[18] Lu Ning. The problem of successive functions to approach to the dispeesed data [J]. *Journal of Northwestern Institute of Architectural Engineering*, 1993(1): 41-46. (in Chinese)
陆宁. 离散数据的连续函数拟合问题[J]. 西北建筑工程学院学报, 1993(1): 41-46.

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net