

文章编号 1004-924X(2013)06-1568-08

大口径深空探测天线的抗风干扰伺服系统

孙明玮^{1*}, 邱德敏^{1,2}, 王永坤¹, 陈增强¹

(1. 南开大学 自动化系, 天津 300071; 2. 中国西安卫星测控中心, 陕西 西安 710043)

摘要: 为了改善风载荷干扰对深空探测天线跟踪精度和寿命的影响, 设计了位置环线性自抗扰控制器。由于扰动观测器可以改善系统性能, 本文基于电机动力学机理, 将电流与速度的反馈与负载的影响作为总扰动的一部分, 通过静态增益对前向通道的惯性环节进行近似, 极大地降低了扩张状态观测器的阶次; 采用在线估计和补偿策略, 抑制了风载荷干扰对控制系统的不利影响; 利用描述函数法分析了包含摩擦特性的非线性系统闭环特性, 说明这种控制策略可以避免极限环的产生。最后, 开展了数学仿真和现场试验。在一深空探测系统上的应用结果显示, 提出的控制策略超调比原产品减少了 34%, 抗击阵风干扰能力提高了 60%, 跟踪精度提高显著。得到的结果表明设计的控制策略提高了系统抗风干扰的能力。

关键词: 深空探测天线; 线性自抗扰控制; 扩张状态观测器; 描述函数法; 极限环; 随机风干扰

中图分类号: TP273, V443.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132106.1568

Wind disturbance rejection servo system for large deep space observatory antenna

SUN Ming-wei¹, QIU De-min^{1,2}, WANG Yong-kun¹, CHEN Zeng-qiang¹

(1. Department of Automation, Nankai University, Tianjin 300071, China;

2. Xi'an Satellite Control Center, Xi'an 710043, China)

* Corresponding author, E-mail: sun_mingwei@aliyun.com

Abstract: With the aim to attenuate the effect of wind load disturbance on the tracking precision and the life-span of a large deep space observatory antenna, this paper proposed a wind disturbance rejection servo system. As disturbance observer can improve the system performance, the mechanism of electrical motor was utilized to simplify the design process. The feedback channels of current and speed control as well as load impact were regarded as parts of the total disturbance, and the lags in the feed-forward channels were approximated by their steady gains respectively. Therefore, the required order of the extended state observer, which was employed to estimate the total disturbance, including the wind load torque and other uncertain mechanical dynamics, could be substantially reduced. Then, the total disturbance was compensated by the observer. Furthermore, the limit cycle was eliminated in the presence of friction according to the describing function method. Finally, mathematical simulations and experiments were carried out. In the experiment, the overshoot is reduced by 34% and the capaci-

收稿日期: 2013-01-11; 修订日期: 2013-02-26.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61174094, No. 61273138); 新世纪优秀人才支持计划资助项目 (No. NCET-10-0506)

ty of gust rejection is increased by 60%, respectively, as compared with that of traditional equipment, while the tracking precision is also raised significantly. The objective of rejecting the wind gust disturbance for the large deep space observatory antenna system can be achieved by using the proposed method.

Key words: large deep space observatory antenna; linear active disturbance rejection control; extended state observer; describing function method; limit cycle; gust disturbance

1 引言

月球和深空探测等所采用的新型和高密度航天器发射任务要求测控天线控制系统不仅要有更高的跟踪精度,良好的动态性能,较好的低速平稳性,还应有更好的抗干扰能力和可靠性。由于深空探测天线体积巨大,风载荷干扰力矩成为影响其跟踪精度的关键因素^[1]。传统的PID控制器虽然具有结构简单、参数易于调整等优点,但在复杂干扰条件下,难以达到稳定满意的控制效果,无法满足未来深空探测的要求。LQG (Linear Quadratic Gaussian)控制^[2-3]和 H_∞ 控制^[4]等现代控制方法在大型天线上也有应用研究,但是由于控制器的形式过于复杂或者阶次过高,使得参数调试十分繁琐,在实际应用中碰到了很多困难。

自从中国科学院系统科学研究所的韩京清研究员创立自抗扰控制(Active Disturbance Rejection Control, ADRC)以来,目前已基本发展成为一类实用的控制技术^[5]。在一些伺服及稳定^[6-10]平台系统中,ADRC已经有比较成功的应用。美国Cleveland州立大学的高志强教授通过

参数化的方式,给出形式简洁的线性ADRC(Linear ADRC, LADRC)^[11],LADRC控制参数少而且物理意义明确,十分便于现场调试。本文以某型号深空探测天线控制系统为研究对象,设计了位置环线性自抗扰控制器。通过剖析电机控制机理,利用力学关系特点简化了设计过程,极大地降低了需用观测器的阶次。然后,采用描述函数法进行了分析,说明该方法可以有效地避免产生极限环。通过仿真和设备试验验证了该系统具有快速响应、超调小、控制精度高和抗风干扰能力强等特点,可以有效减小阵风对深空探测天线造成的扰动。

2 大口径深空探测天线模型

深空探测天线控制系统由3个基本控制环路组成,从外到内依次是位置环、速度环、电流环。位置环由控制计算机及相关软件实现,其控制对象为速度环和电流环及相应硬件组成的伺服系统。目前系统的电流环与速度环都是模拟体制,难以进行大的更改,只有位置环采用计算机数字控制,可以进行算法改进。

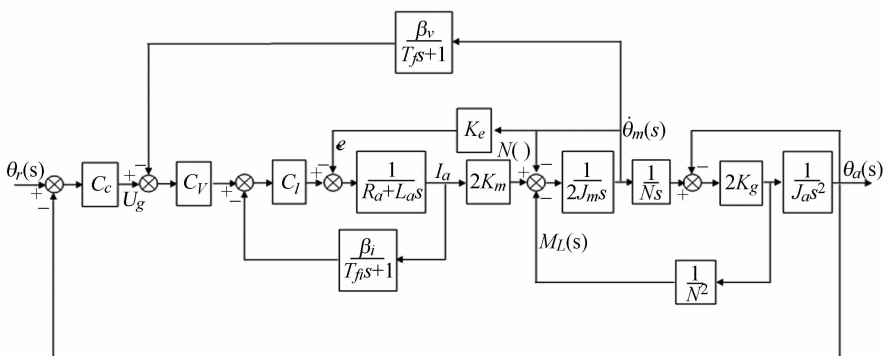


图1 天线三回路控制结构数学模型

Fig. 1 Mathematical model of three-loop control structure for antenna

天线控制结构对应的数学模型如图 1 所示,其中 U_g 为位置环输出控制电压, θ_r 为角位置指令信号, θ_a 为天线实际角位置, I_a 为电机电枢电流, R_a 为电机电枢回路总电阻, L_a 为电机电枢回路总电感, e 为电机反电势, J_m 为电机转动惯量, θ_m 为电机轴角位置, β_i 为电流环反馈系数, β_v 为速度环反馈系数, T_{fi} 为电流环反馈时间常数, T_{fv} 为速度环反馈时间常数, N 为齿轮箱变比, K_g 为单链齿轮箱输出轴端等效刚度, J_a 为天线转动惯量, M_L 为负载折算到电机轴输出端力矩, $N(\cdot)$ 为天线传动链摩擦描述函数, K_m 为电机力矩系数, K_e 为电机反电势系数, C_C 为位置环控制器传递函数, C_V 为速度环 PI 控制器传递函数, C_I 为电流环 PI 控制器传递函数, 二者均为模拟体制, 分别是

$$C_I = k_{p_c} + k_{I_c} / s, \quad (1)$$

$$C_V = k_{p_v} + k_{I_v} / s. \quad (2)$$

3 天线位置环线性自抗扰控制的设计

下面给出位置 LADRC 的设计步骤。通过前面的动力学模型分析, 可以看到天线控制里含有很多环节, 并且由于电流环和速度环控制器的存在, 更增加了模型的复杂性。如果根据实际的动力学微分方程采用相对阶的 ADRC 推导设计方法^[5], 则需要高阶的观测器, 从而导致较大的状态估计时间延迟和应用上的困难。下面给出一种简洁的机理设计方法。由于大口径深空探测天线伺服电机直接驱动传动轴角 θ_m 旋转, 天线盘面的旋转角度 θ_a 是被传动轴带动旋转的, 但是由于 K_g 足够大, 可以近似认为 $\theta_a \approx N\theta_m$ 。因此在设计时, 只需要关注到达 θ_m 的动力学就可以了, 而 θ_a 的作用则相当于对于电机控制的一个负载干扰。但是在后面的分析中, θ_a 的动力学也要考虑。具体到图 1 的回路结构, 采用如下法则进行力学传递关系的简化分析, 以确定位置控制电压 U_g 对于 θ_m 的影响:

(1) 对于所有的反馈通道, 由于反馈变量都是电流、角速度或者角度等信息, 把它们作为 U_g 的影响结果变量(也就是之前的 U_g 累积效果产生), 都可以视为干扰变量的一部分。

(2) 在前向通道中除了积分外的每一个环节, 在没有出现饱和之前, 都可以看成是输入量被

稳态增益放大之后, 同时受到一个历史输入量累积效果产生的干扰。特别是当该环节时间常数比较小时, 直流分量起主要作用, 其他分量可以视为干扰变量的一部分。

通过这样的分析, 可以定义如下的状态:

$$\begin{cases} y = \theta_a \\ x_1 = y \\ x_2 = \dot{y} \\ x_3 = d \end{cases}, \quad (3)$$

这里的状态 x_3 被称为扩张状态(Extended State)^[5], 它并没有明确的物理意义, 而是对需要抑制的风扰动及其他因素的一个综合(其中一部分可以看成是 U_g 历史数据的积累性影响), 而不需要对其分别估计建模, 这是 ADRC 的核心所在。换个角度, 考虑天线电机的控制机理: 控制电压产生近似线性关系的电流分量, 这一过程相当于控制力矩, 驱动产生角速度, 最后得到角度信息。这样, 可以把控制电压到角度输出直接近似成二阶积分环节, 而中间受到的各种干扰(风干扰和模型参数不确定性等)以及电流环和速度环的控制产生的效应形成总扰动力矩信号。此时, 根据前面的分析原则, 可以得到如下的状态方程形式:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 + b_0 U_g \\ \dot{x}_3 = \xi \\ y = x_1 \end{cases}, \quad (4)$$

这里 ξ 设为系统扰动, 包括负载反馈干扰、未建模动态、风干扰因素等多种因素。这里的 b_0 通过前面的准则, 可以直接写出其标称值为:

$$b_0 = \frac{k_{p_c} k_{p_v} K_m}{NR_a J_m}, \quad (5)$$

而系统(4)的线性状态观测器为:

$$\begin{cases} e = z_1 - y \\ \dot{z}_1 = z_2 - 3\omega_0 e \\ \dot{z}_2 = z_3 + b_0 U_g - 3\omega_0^2 e \\ \dot{z}_3 = -\omega_0^3 e \end{cases}, \quad (6)$$

当观测器的带宽 ω_0 选取合适时, 有 $z_3 \approx x_3$ 。当满足如下条件时:

$$U_g = \frac{U_0 - z_3}{b_0}, \quad (7)$$

其中 U_0 是中间控制变量, 原被控对象可近似化为:

$$\ddot{y}=U_0, \quad (8)$$

这是一个二阶积分环节,采用普通的 PD 控制就可以实现无差控制,也就是

$$U_0=k_p(\theta_r-\theta_a)-k_d\dot{\theta}_a, \quad (9)$$

其中角速度 $\dot{\theta}_a$ 通过角度差分得到。这样整个位置控制器可以写为:

$$U_g=\frac{k_p(\theta_r-\theta_a)-k_d\dot{\theta}_a-z_3}{b_0}. \quad (10)$$

4 极限环特性分析

电机控制中的一大问题是由于摩擦的存在,使得低速性能一般比较差,包括容易产生爬行、削

顶和静差等特性。但是如果使用 PID 控制,很容易引入极限环振荡等不良现象^[12]。下面对于 LADRC 位置控制的引入进行相关分析。

通过简单推导,可得位置 LADRC 等效于下述控制:

$$U_g=u_{PD}+\frac{\omega_0^3}{s^2+3\omega_0s+3\omega_0^2}\left(\frac{u_{PD}}{s}-\frac{\dot{y}}{b_0}\right), \quad (11)$$

其中

$$u_{PD}=\frac{k_p(\theta_r-\theta_a)-k_d\dot{\theta}_a}{b_0}, \quad (12)$$

可见,位置 LADRC 就是传统 PD 控制的一个简单校正。通过简单推导,可以得到从位置控制信号到天线面角速度的传递函数为:

$$G(s)=\frac{\dot{\theta}_a}{U_g}(s)=\frac{4K_mK_gN^2C_cC_v(T_{f_i}s+1)(T_f s+1)}{\left[\begin{aligned} &(T_f s+1)((R_a+L_a s)(T_{f_i}s+1)+\beta_i C_c)(N^2(2N J_m s+N(\cdot)N)(J_a s^2+2K_g)+2K_g J_a s)+ \\ &2K_m N^3 C_c C_v \beta_v (T_{f_i}s+1)(J_a s^2+2K_g)+2K_m N^3 K_e (T_f s+1)(T_{f_i}s+1)(J_a s^2+2K_g) \end{aligned} \right]}, \quad (13)$$

通过简单推导,闭环特征多项式可以转化为:

$$-\frac{1}{N(\cdot)}=\frac{b_0 N^3 s^2 (s^2+3\omega_0 s+3\omega_0^2)(J_a s^2+2K_g)((T_f s+1)((R_a+L_a s)(T_{f_i}s+1)+\beta_i C_c))}{4K_m K_g N^2 C_c C_v (T_{f_i}s+1)(T_f s+1)(\omega_0^3 s^2+K_d s(s+\omega_0)^3+K_p(s+\omega_0)^3)+} \cdot \left[\begin{aligned} &b_0 s^2 (s^2+3\omega_0 s+3\omega_0^2) \left(((T_f s+1)((R_a+L_a s)(T_{f_i}s+1)+\beta_i C_c)) \cdot \right. \\ &\left. (2N^3 J_m s (J_a s^2+2K_g)+2K_g J_a s)+ \right. \\ &\left. 2K_m N^3 (T_{f_i}s+1)(J_a s^2+2K_g)(C_c C_v \beta_v+K_e (T_f s+1)) \right) \end{aligned} \right], \quad (14)$$

这里摩擦特性只考虑库伦摩擦。库伦摩擦可以近似为符号函数,它的描述函数如下:

$$-1/N(A)=-\pi A/(4M), \quad (15)$$

其中, M 是启动力矩阈值。 $-1/N(A)$ 恰好是负实轴,根据描述函数法,闭环系统是否存在极限环

取决于 Nyquist 曲线是否与式(15)存在交点。代入各项参数后得到 LADRC 系统的 Nyquist 曲线与描述函数的关系如图 2 所示。可见, Nyquist 曲线与负实轴没有交点,说明不存在极限环现象。同理,对于原系统采用的位置 PID 控制系统,可

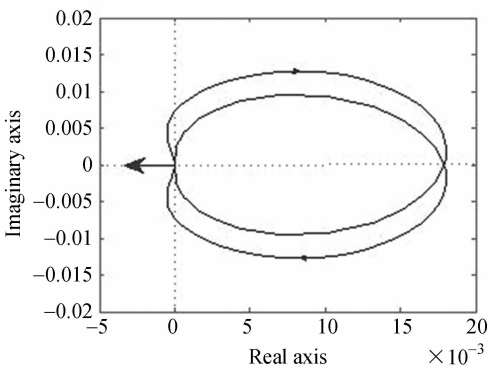


图 2 LADRC 对应的 Nyquist 曲线

Fig. 2 Nyquist curve corresponding to LADRC scheme

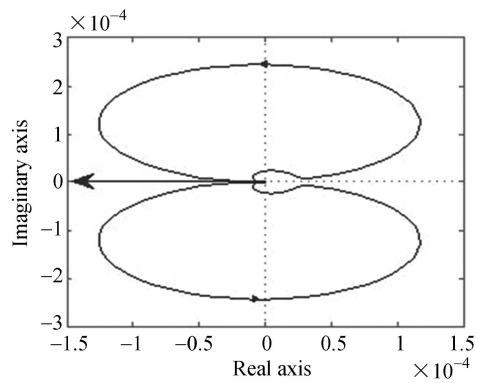


图 3 PID 控制对应的 Nyquist 曲线

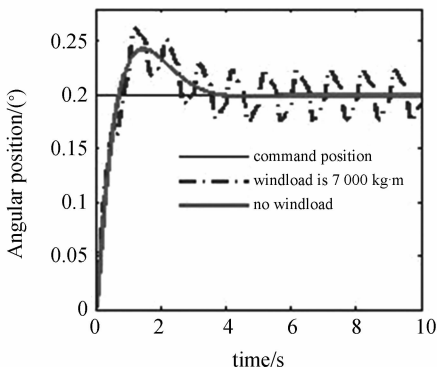
Fig. 3 Nyquist curve corresponding to PID control

以得到它所对应的 Nyquist 曲线如图 3 所示,二者存在交点,说明原系统无法避免极限环现象,这也和已有的理论分析结果一致^[12]。

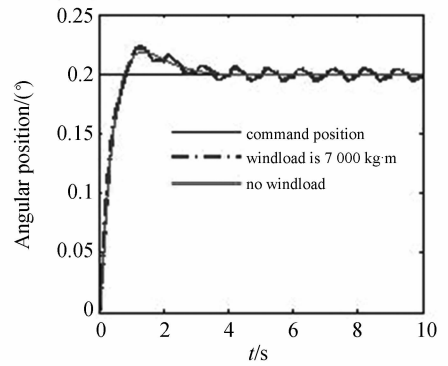
5 数值仿真

在 Matlab/Simulink 环境下,建立位置环自抗扰控制系统,受控对象为双电机伺服驱动系统,风载荷干扰力矩作用于速度环,随风速、天线姿态角以及转速随机变化。研究表明,风载荷主要由静风载荷和脉动风载荷构成,脉动风谱的能量峰值集中于 0~1 Hz 范围内^[13],为验证自抗扰控制器对风干扰的补偿效果,仿真模型中加入周期为 1 Hz 的脉动风载荷干扰(0~7 000 kg·m)。

天线 LADRC 的参数在厂家提供的原 PID 控制参数基础上得到: b_0 按式(5)选取,令 k_p/b_0 和 k_d/b_0 分别等于原 PD 控制参数,得到 k_p 和 k_d ,而观测器带宽取为 $\omega_o=5.0$ 。由于深空探测器与地球相距遥远,相对运动速度较小,故深空探测天线一般处于低速平稳运行状态,角误差很小。在实际运行时,当角误差大于 0.1° 时,电机采用速度环匀转速控制,以保证快速平稳地到达指定位置。只有当角误差小于 0.1° 时,才切入位置闭环控制。不同级别风速仿真情况如图 4 所示。可以看出,理想情况下采用自抗扰控制策略的天线控制系统具有响应快、超调小的优点。在抗风干扰仿真中,原系统传统 PID 控制器受风干扰影响较大,当风速达到 8 级时,天线已无法稳定跟踪目标,而自抗扰控制器能够很好地补偿风干扰作用,天线跟踪角度受到的影响要小很多。



(a) PID 控制模式
(a) PID control scheme



(b) LADRC 控制模式

(b) LADRC control scheme

图 4 风干扰影响下阶跃响应比较

Fig. 4 Comparison of step response with wind disturbance

6 实验结果

将自抗扰控制器应用于某型号深空探测天线的控制系统,分别进行了阶跃响应、收敛特性、跟踪精度实验以及实测 6 级风速时的抗风干扰实验,并与原系统研制厂家采用的 PID 控制器同样条件下的实验结果进行了比较。

6.1 阶跃响应实验

图 5 为天线阶跃响应测试结果对比,动态性能指标结果如表 1 所示。由测试结果可知,天线位置环分别使用 PID 控制器和线性自抗扰控制器时,由表 1 可知,后者伺服系统较前者上升时间减少了 20%,超调下降了 34%,伺服带宽提高了 25%,动态性能明显提高。自抗扰控制采用观测器对系统受到的风干扰以及模型动态扰动进行快速估计从而直接得到补偿量的近似值,同时取消了会给动态品质带来不利影响的单纯积分环节。这种扰动补偿的思想类似于前馈干扰补偿,可以极大地改善动态品质。对于传统 PID 控制而言,这些补偿量往往主要是通过积分环节的迭代收敛得到的,不仅动态过渡时间长,而且在这个过程中需进行反复试凑补偿量,很容易引起振荡。大口径深空探测天线在快速到达指向角度时如果超调较大,产生的惯性过载会对传动机构和天线面造成较大冲击,长期如此运行会导致齿隙增大和传动链的加速磨损,还会造成天线反射面变形,从而使天线电性能偏离指标要求,最终影响测控数据

的精度。因此,自抗扰控制器的平稳性对保证天线测控精度长期稳定具有实际意义,为测控系统自动化运行创造了条件。

表 1 动态性能测试结果

Tab.1 Test results of dynamical properties for servo system

指标 方法	上升时间/s	超调/(%)	伺服带宽/Hz
PID	0.5	22.74	0.8
ADRC	0.4	15.01	1.0

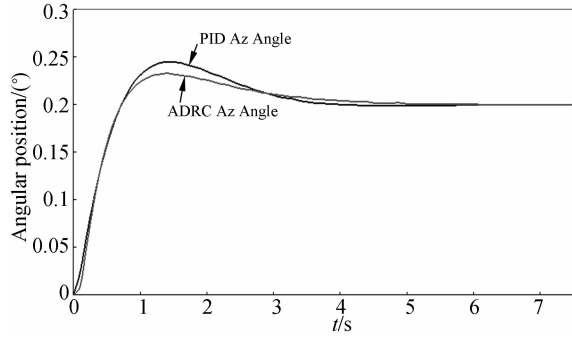
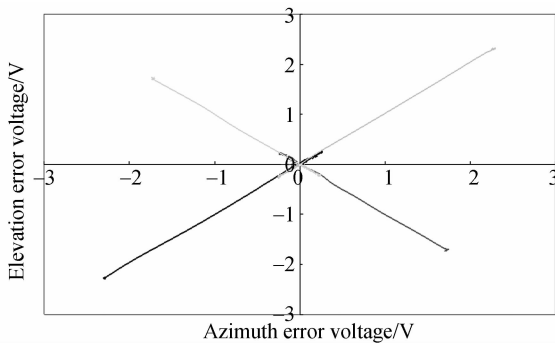


图 5 阶跃响应实验对比

Fig. 5 Experimental comparison step response results

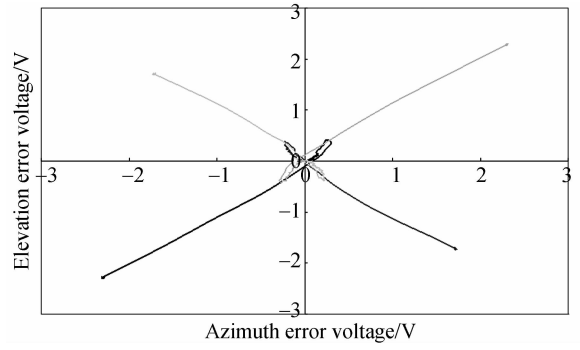
6.2 收敛特性实验

为测试天线控制系统的动态性能,需要检验一定误差范围内控制器的收敛特性。这是一个常规测试项目。设置天线方位俯仰角度分别偏离自跟踪零点一定角度,使跟踪接收机误差电压达到 2 V 左右,天线转为自动跟踪模式,使电轴中心自动对准电零点,同时记录下此过程误差电压的变化曲线。图 6 是 LADRC 和 PID 控制器的天线收敛特性曲线。通过与 PID 控制器的对比可知,自抗扰控制器在 4 个象限内收敛迅速,一致性好且超调很小,能使天线快速稳定地收敛于某一位置。



(a) ADRC 模式

(a) Convergent property of ADRC scheme



(b) PID 控制模式

(b) Convergent property of PID control

图 6 收敛特性实验对比

Fig. 6 Comparison of convergent results

而 PID 控制产生了一定的极限环,这也与前面的分析结果相吻合。

6.3 抗风干扰实验

为检测自抗扰控制器的抗干扰性能,选取 6 级风扰动作用下天线跟踪固定目标的稳态误差为观测指标,测试结果如图 7 所示。在稳定跟踪状态下,自抗扰控制器的稳态误差最大值为 0.003 1°,均方差为 8.67×10^{-6} ,而 PID 控制器的稳态误差最大值为 0.008 4°,均方差为 9.77×10^{-6} ,自抗扰控制器稳态误差与均方差比 PID 控制器分别降低了 63.1% 和 12.7%,说明自抗扰控制比 PID 控制器对阵风扰动补偿效果更好,具有更高的控制精度。

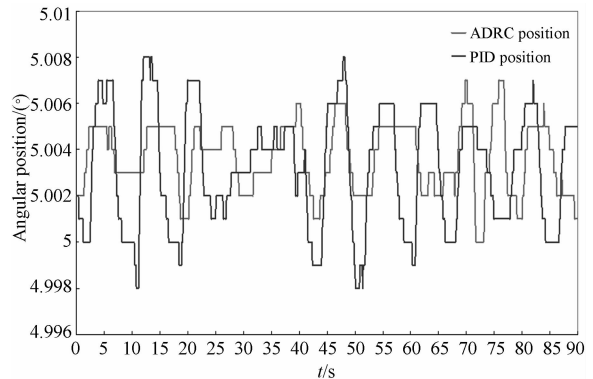


图 7 阵风干扰下稳态误差对比

Fig. 7 Comparison of steady errors under gust disturbance

7 结 论

在现有技术条件下,设计实现了大口径深空

探测天线位置的自抗扰控制系统,可以有效补偿风载荷干扰。设计过程中充分利用了电机动力学机理,将电流与速度控制和负载扰动产生的反馈作为扰动,将前向通道的惯性环节通过静态增益进行近似,极大地降低了扩张观测器的需用阶次。

实验结果表明,超调比原产品减少了 34%,抗击阵风干扰能力提高了 60%,显著降低了大幅超调造成的冲击所导致大口径天线反射面变形,在保护深空探测天线机械结构的同时保证跟踪指向精度长期稳定。

参考文献:

- [1] GAWRONSKI W, BIENKIEWEZ B, HILL R. Wind induced dynamics of a deep space network antenna [J]. *Sound Vibration*, 1994, 178(1): 66-77.
- [2] GAWRONSKI W K, RACHO C S, MELLSTROM J A. Application of the LQG and feed-forward controllers to the deep space network antennas [J]. *IEEE Transactions on Control System Technology*, 1995, 3(4):417-421.
- [3] GAWRONSKI W, SOUCCAR K. Control systems of the large millimeter telescope [J]. *IEEE Antennas and Propagation*, 2005, 47(4): 41-49.
- [4] GAWRONSKI W. Antenna control systems: from PI to H_{∞} [J]. *IEEE Antennas and Propagation*, 2001, 43(1):52-60.
- [5] HAN J. From PID to active disturbance rejection control [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 56(3):900-906.
- [6] LI S, YANG X, YANG D. Active disturbance rejection control for high pointing accuracy and rotation speed [J]. *Automatica*, 2009, 45(8):1854-1860.
- [7] 王帅, 李洪文, 孟浩然, 等. 光电望远镜伺服系统速度环的自抗扰控制[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(10):2442-2449.
- WANG SH, LI H W, MENG H R, *et al.*. Active disturbance rejection controller for speed-loop in telescope servo system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(10): 2442-2449. (in Chinese)
- [8] 李锦英, 付承毓, 唐涛, 等. 运动平台上光电跟踪系统的自抗扰控制器设计[J]. *控制理论与应用*, 2012, 29(7): 955-958.
- LI J Y, FU CH Y, TANG T, *et al.*. Design of active disturbance-rejection controller for photoelectric tracking system on moving bed [J]. *Control Theory & Applications*, 2012, 29(7): 955-958. (in Chinese)
- [9] LIU H, LI S. Speed control for PMSM servo system using predictive functional control and extended state observer [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, 59(2):1171-1183.
- [10] 黄浦, 修吉宏, 李军, 等. 航空相机镜筒位置控制的扰动估计与补偿[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(4): 803-810.
- HUANG P, XIU J H, LI J, *et al.*. Disturbance estimation and compensation of position control of lensbarrels aerial cameras [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(4): 803-810. (in Chinese)
- [11] GAO Z. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning [C]. *Proceedings of the American Control Conference*, 2003: 4989-4996.
- [12] OLSSON H, ASTRO M K J. Friction generated limit cycles [J]. *IEEE Transactions on Control System Technology*, 2001, 9(4): 629-636.
- [13] DAVENPORT A G. The spectrum of horizontal gustiness near the ground in high winds [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1961, 87(132):194-211.

作者简介:



孙明玮(1972—),男,北京人,博士,副教授,2000年于南开大学获得博士学位,主要从事自抗扰控制、模型预测控制、飞行器制导与控制方面的研究。E-mail: sun_mingwei@aliyun.com



邱德敏(1981—),男,山东青岛人,硕士研究生,工程师,2004年于北京航空航天大学获得学士学位,主要从事航天遥控遥测方面的研究。E-mail: mur-ray001@sina.com



王永坤(1988—),男,河南洛阳人,硕士研究生,2011年于东华理工大学获得学士学位,主要从事自抗扰控制及飞行器制导与控制方面的研究。E-mail: 413575025@qq.com



陈增强(1964—),男,天津人,博士,教授,博士生导师,1987年、1990年和1997年于南开大学分别获得学士、硕士和博士学位,现为南开大学机器人与信息自动化研究所副所长,主要从事模型预测控制、智能控制和非线性控制等方面的研究。E-mail: chenzq@nankai.edu.cn

(本栏目编辑:马健)

(版权所有 未经许可 不得转载)