

文章编号 1004-924X(2010)03-0616-07

自抗扰技术在卫星姿态模拟系统中的应用

廉 明, 韩振宇, 富宏亚

(哈尔滨工业大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:建立了高精度卫星姿态模拟系统用于光通信地面仿真试验,针对卫星轨迹特点,设计了一种改进的自抗扰控制算法。介绍了自抗扰控制技术的特点和控制原理,提出改进的伺服算法,为自抗扰算法引入了选择性积分项。针对系统 $\pm 10''$ 动态误差要求,设计了多阈值非线性函数,并添加状态判断模块实时更改非线性函数参数。同时,给出了算法主要参数的整定原则。然后,基于控制器开放伺服功能,给出了自抗扰控制的实现方法和计算流程。实验结果表明:系统具有良好的连续加减速能力,跟踪斜坡信号的动态误差为 $\pm 6''$;经对比,在跟踪卫星姿态轨迹时,自抗扰控制的抗干扰能力优于PID控制,跟随误差达到 $\pm 7''$,满足高精度姿态仿真要求。

关键词:姿态模拟;自抗扰;开放伺服;非线性函数;参数整定

中图分类号:TP273.3 **文献标识码:**A

Application of active disturbances rejection control technique to satellite attitude simulation system

LIAN Ming, HAN Zhen-yu, FU Hong-ya

(School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: A high-precision satellite attitude simulation system for ground-based optical communication experiment was established. For the features of satellite trajectory, an improved auto-disturbance-rejection control algorithm was designed. The characteristics and principle of auto disturbance rejection control technology were introduced. Then, the improved servo algorithm was proposed and an selective integration item was added for ADRC algorithm. To achieve the dynamic error of $\pm 10''$ for the system, a multi-threshold nonlinear function was designed, and a state determine module was added to change nonlinear function parameters in real time. At the same time, the setting principle of algorithm parameters was given, and the realized method and process for improved ADRC algorithm were presented based on the open servo functions of controller. The experimental results show that the system has a good capacity for acceleration and deceleration and the dynamics following error of tracking ramp signal is $\pm 6''$. By contrast, the auto-disturbance-rejection control of anti-interference ability is superior to PID in the satellite attitude trajectory tracking, and the following error is $\pm 7''$. These results meet the requirements of high-precision attitude simulation and also have stability and strong anti-interference ability.

收稿日期:2009-05-18;修订日期:2009-08-07.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2004AA744042)

Key words: Attitude simulation; Auto-disturbance-rejection; Open servo; Non-linear function; Parameter setting

1 引言

实物、半实物仿真是验证设备性能的重要手段^[1-2]。在空间激光通信地面仿真试验中,通信终端搭载在三轴仿真转台上,用于模拟通讯卫星在轨时的姿态变化。在模拟卫星姿态变化时,通信终端要完成捕获、瞄准、跟踪等多项任务。负载的运动严重干扰仿真转台的控制精度,这也使得仿真转台成为一种强耦合、强干扰系统。虽然PID在控制领域应用广泛^[3],但要在这种复杂环境下达到高精度跟踪卫星轨迹,还有很大困难。

自抗扰控制技术是在PID的基础上发展起来的新型控制技术,它不依赖于被控对象的数学模型,把系统的未建模动态误差和未知外扰(包括耦合项,这里主要是终端运动造成的)都归结为对系统的总扰动而进行估计补偿^[4]。自抗扰控制技术继承了PID控制器的靠反馈误差来消除误差的控制策略,对误差信号、微分信号的提取做了一系列改进,使用扩张状态观测器观测出系统的状态和综合扰动项,得到广义状态误差并对各扰动项进行前馈补偿。最后,用非线性加权的方法计算控制律,使控制系统在稳定性和鲁棒性方面都有显著提高。近年来,自抗扰技术在电力系统、精密机械、武器系统等领域得到了广泛应用^[5-8]。本文针对卫星姿态仿真平台特点,对自抗扰控制器进行了改进,使其满足精度高,抗干扰能力强等要求。

2 改进自抗扰控制器

2.1 自抗扰控制器的组成

自抗扰控制器由跟踪微分器(TD)、扩张状态观测器(ESO)和非线性状态误差反馈控制律(NLSEF)三部分组成。跟踪微分器实现对输入信号的快速无超调跟踪,并给出参考输入的各阶导数跟踪信号;扩张状态观测器则用来估计系统状态、模型和外扰的实时作用量给以“补偿”;非线性反馈控制律是利用误差及其微分来生成对扰动的补偿控制量。文献[4]中给出了各组成部分的

详细说明,其算法的离散形式如下表示。

跟踪微分器(TD):

$$\begin{cases} \delta = r \cdot h_0 \\ \delta_0 = \delta \cdot h_0 \\ y = x_1 - u + h_0 \cdot x_2 \end{cases}, \quad (1)$$

$$a_0 = \sqrt{\delta^2 + 8r|y|}, \quad (2)$$

$$a = \begin{cases} x_2 + y/h_0, & |y| \leq \delta_0 \\ x_2 + 0.5(a_0 - \delta) \cdot \text{sign}(y), & |y| > \delta_0 \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{fst}(x_1, x_2, r, h_0) = \begin{cases} -\frac{r \cdot a}{\delta}, & |a| \leq \delta_0 \\ -r \cdot \text{sign}(a), & |y| > \delta_0 \end{cases}, \quad (4)$$

$$\begin{cases} v_1(k+1) = v_1(k) + h \cdot v_2(k) \\ v_2(k+1) = v_2(k) + h \cdot \text{fst}(v_1(k) - v_0, v_2(k), r, h_0) \end{cases}, \quad (5)$$

其中, v_1, v_2 分别为TD输出的位置及其微分; h_0 为滤波因子, h 为计算步长, r 为速度因子; $\delta, \delta_0, x_1, x_2, y, a_0, a$ 均为计算过程中的中间参数; u 为控制输出。

扩张状态观测器(ESO):

$$\begin{cases} \epsilon_1 = z_1 - y \\ z_1(k+1) = z_1(k) + h(z_2(k) - \beta_{01}\epsilon_1) \\ z_2(k+1) = z_2(k) + h(z_3(k) - \beta_{02}\text{fal}(\epsilon_1, \alpha_1, \delta) + b_0 u(k)) \\ z_3(k+1) = z_3(k) - h\beta_{03}\text{fal}(\epsilon_1, \alpha_2, \delta) \end{cases}, \quad (6)$$

$$\text{fal}(\epsilon, \alpha, \delta) = \begin{cases} |\epsilon|^\alpha \text{sign}(\epsilon), & |\epsilon| > \delta \\ \epsilon/\delta^{1-\alpha}, & |\epsilon| \leq \delta \end{cases}, \quad (7)$$

其中, z_1, z_2, z_3 为ESO输出, $\beta_{01}, \beta_{02}, \beta_{03}$ 为可调参数, fal 为非线性函数。

非线性状态误差反馈控制律(NLSEF):

$$\begin{cases} e_1 = v_1(k) - z_1(k) \\ e_2 = v_2(k) - z_2(k) \\ u_0 = \beta_{11}\text{fal}(e_1, \alpha_1, \delta_1) + \beta_{12}\text{fal}(e_2, \alpha_2, \delta_2) \\ u(k) = u_0 - \frac{z_3(k)}{b_0} \end{cases}, \quad (8)$$

其中, e_1, e_2 为误差及其微分; β_{11}, β_{12} 为可调参数; u 为控制输出。

2.2 选择性积分项的添加

控制系统中引入积分环节的目的是为了消除静差,提高精度。但根据积分误差累积的特点,在

$$\begin{cases} e_1 = v_1(k) - z_1(k) \\ e_2 = v_2(k) - z_2(k) \\ u_0 = \beta_{11} \text{mtfal}(e_1, \alpha_1, \alpha_2, k, \delta_1) + \beta_{12} \text{mtfal}(e_2, \alpha_1, \alpha_2, k, \delta_2) + \beta_{13} \text{IPOS} \\ u(k) = u_0 - z_3(k)/b_0 \end{cases}, \quad (10)$$

2.4 状态判断及参数更改

对于 mtfal 函数中指数 α_1, α_2 的选取,可以根据实际情况设计多种组合,本文根据误差及其微分设计了状态查询表,按照 0、较小、较大 3 种情况将 α_1, α_2 分成 9 种组合,见表 1 所示。表中的 $|e_1|, |e_2|$ 分别是 TD 和 ESO 输出量之差, $|e_1|$ 表示位置误差, $|e_2|$ 表示误差变化率。基本原则是当误差或其变化率较小或为 0 时,采用变化缓慢的控制率计算输出;当误差或其变化率较大时用较大的变化率尽快消除误差。

表 1 状态判断规则表

Tab.1 State judge rules (α_1/α_2)

$ e_2 $	$ e_1 $		
	0	较小	较大
0	0.25/1	0.5/1	0.75/1.25
较小	0.5/1	0.5/1.25	0.75/1.5
较大	0.75/1.25	0.75/1.5	0.75/2

3 改进 ADRC 的实现方法

3.1 参数整定原则

参数的好坏决定自抗扰控制器能否发挥出应有的性能,整定参数时可以将 ADRC 分成 TD, ESO, NLSEF3 部分考虑。TD 的参数选择相对简单,计算步距 h 根据控制芯片的计算能力确定,同时还要兼顾系统处理 I/O 信号的能力。 h_0 可以起到滤波作用,参数 r 决定 TD 跟踪信号的快慢, r 越大过渡过程越短。

ESO 参数 $\beta_{01}, \beta_{02}, \beta_{03}$ 对闭环系统的动态特性影响很大,其中, β_{01}, β_{02} 用来计算各阶状态变量 z_1, z_2 。 β_{03} 则影响对象总扰动实时作用量 z_3 的大小。韩京清等人根据数值仿真给出经验公式确定: $\beta_{01} = 1/h, \beta_{02} = 1/3h^2, \beta_{03} = 2/8^2h^3$ 。

自抗扰控制器中参数 b_0 比较特殊,它既与控制量 u 有关,又与状态观测器的扰动观测量相联系,当 b_0 较大时,经 ESO 微分状态变量把 b_0u 反

馈回 TD 后,产生一个大误差控制信号把对象激励起来,让输出响应加快;同时由公式 z_3/b_0 可以看出, b_0 取较大值可以有效地补偿扰动和模型的不确定因素。

非线性控制器中的参数 $\beta_{11}, \beta_{12}, \beta_{13}$ 可以近似看作比例、微分和积分系数,不同之处在于 β_{11}, β_{12} 对应的误差由 mtfal 函数生成, β_{13} 则用作选择性误差累加。参数 k, δ_1, δ_2 的选择要根据实际情况确定,对于本文中的姿态模拟系统,希望稳定后的动态跟随误差 $< \pm 10''$, 为避免系统在误差 0 附近震荡,取 δ 为 $2''$; 当误差 $> 8''$ 时,希望以较大的控制量消除误差,因此这里 k 取 4; 误差越大,控制器会以更快的速度增大控制量。

状态判断模块主要负责调整 mtfal 函数参数,对于姿态模拟系统,跟随误差要求在 $10''$, 根据这一指标分配表 1 中模糊量的数值。误差 $|e_1|$ 一栏的“零”项对应 $1''$ 以下;“较小”项对应 $1'' \sim 10''$;“较大”项对应 $10''$ 以上,微分项 $|e_2|$ 的变化“零”、“较小”、“较大”3 项分别取 $5'', 5'' \sim 40''$ 和 $40''$ 以上。在实验过程中,应耐心地反复摸索参数的取值范围,以期达到较好的控制效果。

3.2 基于 Turbo PMAC 的开放伺服算法

仿真平台的控制器使用 Turbo PMAC 系列运动控制卡,该型卡支持使用 PMAC 的高级语言

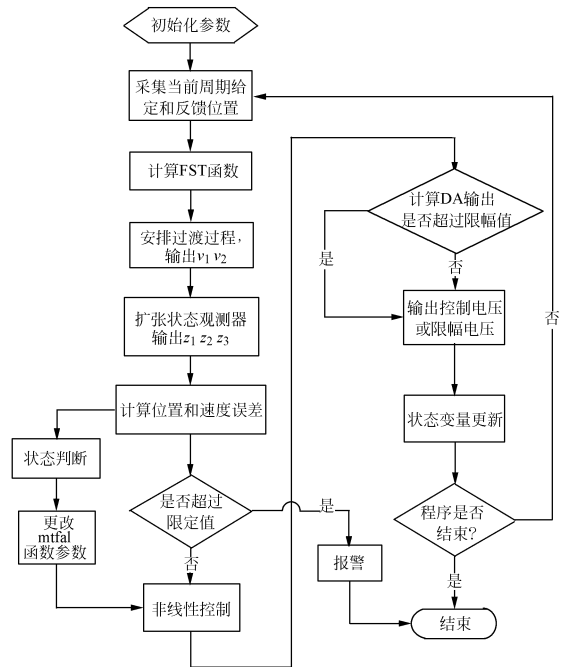


图 4 ADRC 算法流程图

Fig. 4 Flow chart of ADRC algorithm

编写用户自定义伺服算法 (User-Written Servo Algorithms)。本文设计的自抗扰控制算法就是使用了 Turbo PMAC 的这种开放伺服功能。

图 4 给出了自抗扰算法的计算流程。首先,使用 COPYREG 函数采集当前周期的给定和反馈位置分别作为 TD 和 ESO 的输入。由 TD 和 ESO 的输出结果计算得到位置和速度误差,并输入非线性控制模块计算 D/A 输出。状态判断模块根据误差的大小更改函数 mtfal 的参数。为保证安全,本文还设计了超差和限幅保护,当误差超过设定值时,系统报警并结束程序,当 D/A 输出超过限定值时,系统按限定值输出。

4 跟踪对比实验

以搭载终端的模拟平台方位轴为例,考察系统跟踪给定信号的能力。方位轴电机为力矩电机,其峰值力矩为 $50 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。方位轴使用 22 位绝对编码器作为反馈元件,应用本文中的自抗扰控制算法,由运动控制卡实时记录给定位置和反馈位置,并计算其速度和加速度。根据记录值画出相应的曲线。

图 5 给出了跟踪 $0.85^\circ/\text{s}$ 斜坡信号时的跟踪曲线和误差曲线,在系统达到稳定跟踪时误差为 20 cts,约为 $6''$ 。

抛物线曲线的特点是使系统始终处于连续加减速状态,这样可以检测系统在速度反复变化的情况下跟踪给定信号的能力。图 6 给出了跟踪幅值 1° ,时间 8 s 的抛物线信号的效果图。

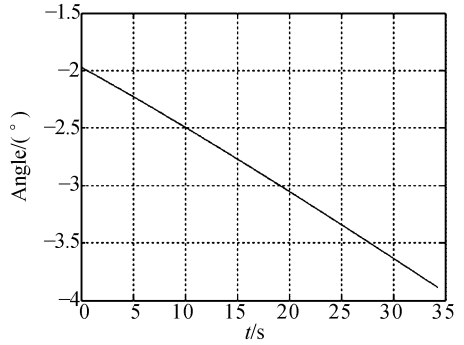
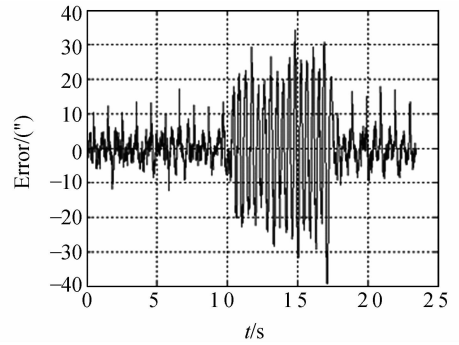
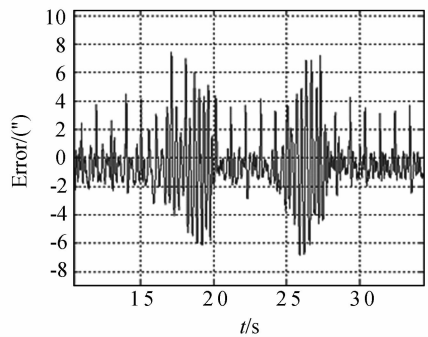


图 7 跟踪姿态仿真轨迹效果图

Fig. 7 Result of tracking attitude trajectory



(a) PID



(b) ADRC

图 8 干扰条件下,跟踪仿真轨迹 PID 与 ADRC 误差对比图

Fig. 8 Contrast result of PID and ADRC of tracking attitude trajectory under disturbance

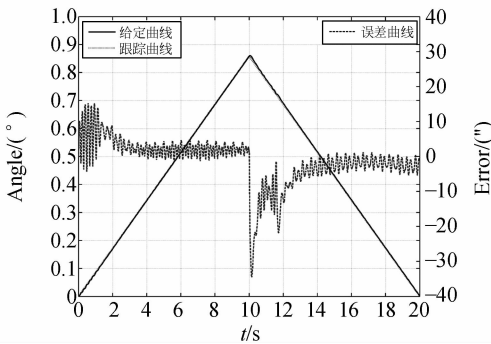


图 5 跟踪斜坡信号效果图

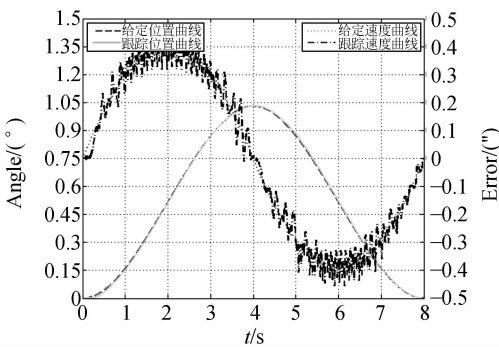


图 6 跟踪抛物线信号效果图

Fig. 6 Results of tracking parabolic signal following

当跟踪卫星姿态仿真轨迹时,系统会受到终端运动的力矩干扰。为验证系统的抗干扰能力,本文分别使用 PID 和 ADRC 两种算法进行对比试验。图 7 给出了方位轴跟踪仿真轨迹的给定和反馈曲线。

图 8(a)为使用 PID 算法时的误差曲线,图 8(b)为使用 ADRC 算法时的误差曲线。在受到终端摆动所引起的力矩干扰时,PID 算法的跟随误差由 $\pm 10''$ 增大到 $\pm 30''$ 。ADRC 算法的跟踪效果明显优于前者,跟随误差由 $\pm 4''$ 增大到 $\pm 7''$,仍然小于 $\pm 10''$ 的误差要求。

上述结果表明系统能够良好地跟踪给定信号,跟踪姿态仿真轨迹时,能够有效抑制终端干

扰,达到高精度跟踪的要求。

5 结 论

本文以卫星姿态模拟系统为背景,设计了一种新型自抗扰控制算法。在介绍 ADRC 原理的基础上分别提出了选择性积分项、多阈值非线性函数和状态判断模块 3 项改进技术,随后给出了算法流程及测试结果。实验验证了改进 ADRC 算法的可行性,并给出跟踪给定信号的试验结果,系统在跟踪终端干扰条件下的姿态轨迹时,能够满足 $\pm 10''$ 的动态跟踪误差指标,说明该算法具有良好的实用价值。

参考文献:

- [1] 王绍举,金光,徐开. 高精度激光通信小卫星星座仿真平台设计[J]. 光学精密工程,2008,16(8):1554-1559.
WANG S J, JIN G, XU K. Design of simulation platform for high precision laser communication small satellite constellation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(8):1554-1559. (in Chinese)
- [2] 厉明,纪勇,贾宏光,等. 基于快速仿真原型的飞行器半物理仿真系统[J]. 光学精密工程,2008,16(10):1949-1955.
LI M, JI Y, JIA H G, *et al.*. Hardware in closed loop simulation system for aircraft based on rapid simulation prototype [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(10):1949-1955 (in Chinese)
- [3] 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.
LI H W. Servo system of large telescope based on internal model PID control method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(2):327-332. (in Chinese)
- [4] HAN J Q. From PID to active disturbance rejection control [C]. *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Electronics, P. R. China: IE*, 2009:900-906.
- [5] 周黎妮,唐国金,李海阳. 航天器姿态机动的自抗扰控制器设计[J]. 系统工程与电子技术,2007,29(12):2122-2126.
ZHOU L N, TANG G J, LI H Y. Active disturbance rejection controller design for spacecraft attitude maneuver [J]. *Systems Engineering and Electronic*, 2007,29(12):2122-2126. (in Chinese)
- [6] 翟军红,王红宣,陈娟,等. 大口径光电望远镜风阻力矩自抗扰补偿研究[J]. 光电工程,2007,34(12):12-16.
ZHAI J H, WANG H X, CHEN J, *et al.*. Active disturbance rejection controller to compensate the wind disturbance for the optoelectronic telescope with large aperture [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007,34(12):12-16. (in Chinese)
- [7] 张晨光,陈大融. 基于自抗扰控制技术的鲁棒制导律设计[J]. 弹箭与制导学报,2008,28(6):6-10.
ZHANG C G, CHEN D R. Robust guidance law design based on active disturbance rejection control [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2008,28(6):6-10. (in Chinese)
- [8] 韩京清. 时滞对象的自抗扰控制[J]. 控制工程,2008,15(S1):7-10.
HAN J Q. Auto-disturbances rejection control for time-delay systems [J]. *Control Engineering of China*, 2008,15(S1):7-10. (in Chinese)
- [9] LEI CH L, WU J, CHEN Y R, *et al.*. Permanent-magnet linear motor control system based on the auto-disturbance-rejection controller (ADRC) [C]. *Proceedings of the Sixth International Conference on Electrical Machines and Systems: ICEMS*, 2003:62-65.
- [10] 吴猛,朱喜林,鄂世举. 自抗扰控制器参数整定方法的研究[J]. 北京理工大学学报,2009,29(2):121-127.
WU M, ZHU X L, E SH J. A study on parameters setting methods for active disturbance rejection controller (ADRC) [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2009,29(2):121-127.

- [11] LIU B, XIA Y Q, CHEN J. Decoupling double-loop control system with ADRC [C]. *Proceedings of the IEEE International Conference on Innova-*

tive Computing Information and Control, P. R. China; ICICIC, 2008;346.

作者简介:



廉 明(1981—),男,黑龙江哈尔滨人,博士研究生,主要从事伺服控制系统开发、控制算法设计、模式识别等方面的研究。E-mail: lianming_hit@126.com



韩振宇(1978—),男,山东人,副教授,主要从事机械制造自动化技术、集成制造系统、超精密加工数控系统的研究。E-mail: hanzy@hit.edu.cn

导师简介:



富宏亚(1963—),男,黑龙江齐齐哈尔人,教授,博士生导师,主要从事数控技术、机电控制技术、智能加工技术、纤维复合材料成型 CAD/CAM 技术的研究。E-mail: hongyafu@hit.edu.cn

●下期预告

采用亚微米埋入式光栅的彩色滤光片

叶 燕,周 云,张 恒,陈林森

(苏州大学 信息光学工程研究所,江苏 苏州 215006)

为进一步提高彩色滤光片的色度性能和光能利用率,设计一种宽带宽高透射率的亚微米埋入式光栅。该结构由 PMMA 基底、ZnS 膜层、二维 Al 金属光栅和 SiO₂ 覆盖层等组成。采用严格耦合波理论分析了 ZnS 膜层厚度、周期、占空比等结构参数对透射光谱特性的影响,并在此基础上优化结构参数,获得宽带宽滤波输出。当透射光谱中心波长为 635 nm、530 nm 和 455 nm 时,相应透射效率分别为 68%、78%和 71%,半极大值处全宽(FWHM)约 100 nm。计算结果表明,与其他应用于彩色滤光片的光栅结构相比,所设计光栅结构的中心光谱透射效率可提高 19%,并有效减少三色输出光谱之间的重叠区域,提高了彩色滤光片的色度性能。