

引用格式:王森,史红伟,李明秋. ADRC在光通信APT系统下的扰动分析及参数整定[J]. 电光与控制,2018,25(11):48-51,111. WANG S, SHI H W, LI M Q. Perturbation analysis and parameter tuning of ADRC in optical communication APT system[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(11):48-51, 111.

ADRC在光通信APT系统下的扰动分析及参数整定

王森, 史红伟, 李明秋

(长春理工大学电子信息工程学院, 长春 130022)

摘要: 由于ADRC控制策略相比传统的PID控制方法有着诸多优点,因此该方法应用在了不同的领域。针对当今空间光通信APT系统精跟踪部分,采用自抗扰控制策略对其进行控制:首先分析了线性自抗扰参数对APT系统扰动的影响,然后将自抗扰控制策略加入到实验仿真中,对APT系统的扰动进行实时估计,并通过回路在控制量中加以补偿,最后对自抗扰控制的参数进行整定,以提升精跟踪部分的噪声抑制效果及APT系统的跟踪精度。实验结果表明,自抗扰控制策略应用在光通信APT系统精跟踪部分,减小了系统跟踪误差,提升了系统的快速性,增强了系统鲁棒性,满足空间光通信APT系统的高精度控制和噪声抑制需求。

关键词: 空间光通信APT; 自抗扰控制; 噪声抑制

中图分类号: TN929.1 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2018.11.009

Perturbation Analysis and Parameter Tuning of ADRC in Optical Communication APT System

WANG Sen, SHI Hong-wei, LI Ming-qiu

(School of Electronics and Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: Compared with the traditional PID control method, the Auto Disturbance Rejection Control (ADRC) strategy has many advantages and is applied to various areas. In this paper, the ADRC strategy is used to control the fine tracking part of the optical communication APT system. Firstly, the effect of linear auto disturbance rejection parameters on the perturbation of the APT system is analyzed. Then, the ADRC strategy is applied to the experimental simulation, a real-time estimation of the perturbation of the APT system is made, and the perturbation is compensated by the loop in the control quantity. Finally, the ADRC parameters are set to improve the noise suppression effect of the fine tracking part and the tracking accuracy of the APT system. The experimental results show that applying the ADRC strategy to the fine tracking part of the optical communication APT system can reduce the tracking error of the system, improve the system's fastness, enhance the robustness of the system, which meets the requirements of high control accuracy and noise suppression of the spatial optical communication APT system.

Key words: spatial optical communication APT; auto disturbance rejection control; noise suppression

0 引言

传统的控制算法在APT系统下存在一些问题,例如控制系统建模困难、扰动抑制能力受到机械谐振制约等,这些问题影响了控制精度的提高。提升控制精度的根本在于扰动的抑制。对于APT系统内外扰动的解决方法,国内已取得许多成果。文献[1]对传递

函数进行参数辨识并将系统带宽进行优化,使系统带宽大幅提高;文献[2]提出误差自适应前馈控制方法,提高了系统抑制光束抖动的能力。韩京清教授提出的自抗扰控制策略^[3-4],将系统受到的所有扰动归结为一个单独扰动,以此达到抑制扰动的目的,使系统有更强的鲁棒性和适应性。

本文将自抗扰控制策略应用于空间光通信APT系统,并分析了自抗扰控制下的参数对APT系统的扰动影响,然后使用线性自抗扰的控制方法,针对扰动做了参数整定,结果证明,自抗扰控制策略对精跟踪部分的扰动抑制性能提升明显,并且对APT系统的控制精

收稿日期:2017-12-11

修回日期:2018-01-04

作者简介:王森(1991—),男,河北保定人,硕士生,研究方向为复杂先进系统控制理论研究与应用。

度有了进一步提高。

1 APT 精跟踪系统自抗扰控制结构及扰动分析

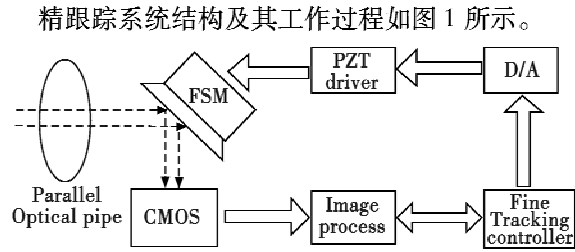


图 1 精跟踪系统结构图

Fig. 1 Structure of fine tracking system

CMOS 接收到信标光的信号,经图像处理和光斑中心位置提取后,由精跟踪控制器计算 FSM 的偏转角度,计算后通过 D/A 模块将控制器的数字信号转换为电压信号,从而驱动 4 个 PZT 运动,以控制 FSM 偏转,在 FSM 的作用下,光斑移动到 CMOS 中心,完成控制任务。

精跟踪系统结构中,PZT 与 FSM 可以看作二阶振荡环节,压电陶瓷的滞环现象、驱动器的蠕变过程以及 CMOS 传感器的延迟可以近似成一个一阶惯性环节^[5],传递函数可以表示为

$$G_d(s) = 1/(Ts + 1) \quad (1)$$

D/A 的数学模型可以看成比例环节 $K_{D/A}$,快速反射镜的数学模型为二阶振荡环节^[6]。

为了减小光斑检测单元和视频信号处理单元对数字伺服单元的影响,需要使图像部分的帧频达到闭环带宽的 10 倍以上,由它引起的相位稳定裕量减少不超过 5.7° ,对精跟踪单元的稳态影响较小,可在仿真中忽略。

则精跟踪的开环模型为

$$G(s) = \frac{K_{D/A} \times \omega^2}{(Ts + 1)(s^2 + 2\xi\omega s + \omega^2)} \quad (2)$$

卫星在空间中运行不可避免地存在自身的机械震动,这个震动是不可消除的。为了模拟真实的环境,根据欧洲航天局(EAS)对 OLYMPLUS 卫星进行的星体震动测试,对星间光通信影响较大的震动频率主要在 100 Hz 以内^[7],功率谱密度函数为

$$S(f) = 160/(1 + f^2) \quad (3)$$

其功率谱曲线如图 2 所示。

由此功率谱曲线设计了一个模拟星体震动的滤波器,形式为

$$W(s) = \frac{190}{0.0023s^3 + 0.053s^2 + 0.4s + 1} \quad (4)$$

根据文献[8]可知,线性自抗扰的参数主要有 b_0 , ω_c , ω_o , 在其文章中引入了新的带宽概念,其中, ω_c 为控制器带宽, ω_o 为观测器带宽。带宽概念的引入,方

便了线性自抗扰控制器的参数整定,大大宽泛了线性自抗扰策略在工程实际中的应用。文献[8]提到的线性状态观测器(LESO)为

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 - \beta_1(z_1 - y) \\ \dot{z}_2 = z_3 - \beta_2(z_1 - y) + b_0 u \\ \dot{z}_3 = -\beta_3(z_1 - y) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\beta_1 = 3\omega_o$; $\beta_2 = 3\omega_o^2$; $\beta_3 = \omega_o^3$ 。

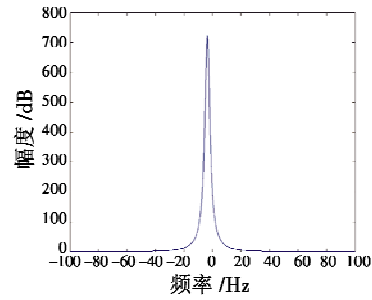


图 2 OLYMPLUS 功率谱曲线

Fig. 2 Power spectrum curve of OLYMPLUS

根据式(4)和式(5)推导可得

$$z_1 = \frac{3\omega_o s^2 + 3\omega_o^2 s + \omega_o^3}{(s + \omega_o)^3} y + \frac{b_0 s}{(s + \omega_o)^3} u \quad (6)$$

在这里重点考虑系统的观测噪声 δ_o 和系统控制输入端的噪声 δ_c 对 LESO 的影响,由式(6)可得系统观测噪声 δ_o 的传递函数为

$$z_1/\delta_o = (3\omega_o s^2 + 3\omega_o^2 s + \omega_o^3)/(s + \omega_o)^3 \quad (7)$$

其波特图如图 3 所示。

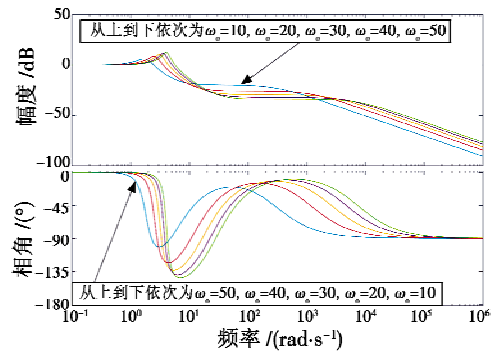


图 3 噪声扰动 Bode 图

Fig. 3 Bode diagram of noise disturbance

由图 3 可以发现,线性系统观测器中,随着 ω_o 增加,系统响应速度加快,同时系统的高频带增益随之增加,从而使系统对噪声放大作用变得明显。

同理可求得系统控制输入端扰动 δ_c 的传递函数为

$$z_1/\delta_c = b_0 s/(s + \omega_o)^3 \quad (8)$$

选取 $b_0 = 10$, ω_o 为 10, 20, 30, 40, 50, 可得如图 4 所示的频域特性。

由图 4 可以发现,系统的状态观测器带宽 ω_o 的增加可以减小观测器跟踪信号的相位滞后,且基本不影

响系统在高频带的增益,即 LESO 对系统控制输入端扰动 δ_0 具有良好的抑制能力。

针对以上结论,对参数进行了如下整定。

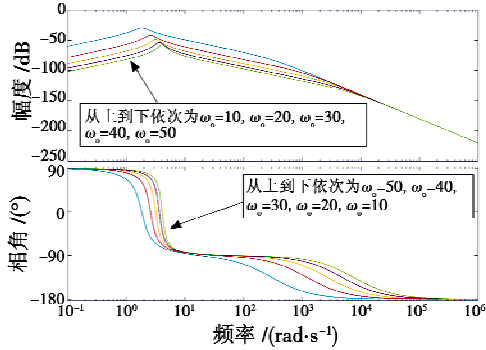


图4 输入扰动 Bode 图

Fig. 4 Bode diagram of input disturbance

2 系统参数整定及分析

为了比对自抗扰控制器针对扰动的性能提升,针对卫星的自振动,本文在仿真中使用了一个白噪声发生器,通过图5模拟的滤波器就可以模拟噪声的干扰^[9]。

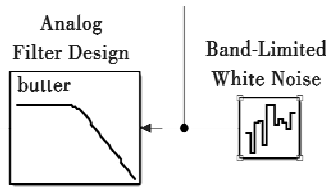


图5 噪声模拟

Fig. 5 Noise simulation

输出的噪声图形如图6所示。

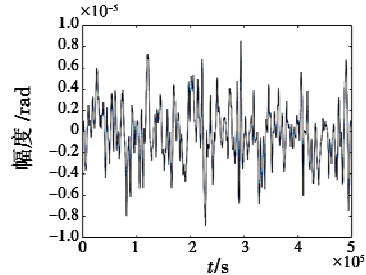


图6 输出噪声波形

Fig. 6 Waveform of output noise

将该模块插入系统的输出部分,并构建控制系统和控制对象。经过试验测试,精跟踪系统可以近似成一个二阶系统,相应采用三阶线性状态观测器进行观测^[10],完成后如图7所示。

针对图7控制对象进行参数整定,调节步骤如下:

- 1) 首先设置输入信号为一个单位阶跃信号,需要调整的参数为 b_0, ω_c, ω_n , 根据系统的传递函数,将 b_0 的值定为 $b_0 = 2 \times 10^7$;
- 2) 根据根轨迹方法,由系统的性能允许范围得到一个初始值带宽 $\bar{\omega}_c$, 并且得到 $\omega_n = 8 \bar{\omega}_c$;
- 3) 选择 $\omega_n = \omega_c$, 对系统进行 Simulink 仿真,对 ω_n, ω_c 进行等量递增,直到超出系统容限(大量仿真表明, ω_n 和 ω_c 之间存在一个简单的对应关系,即 ω_n 为 ω_c 的 3~5 倍);
- 4) 分别增加或者减少 ω_n 或者 ω_c 的值,使系统达到所需性能。

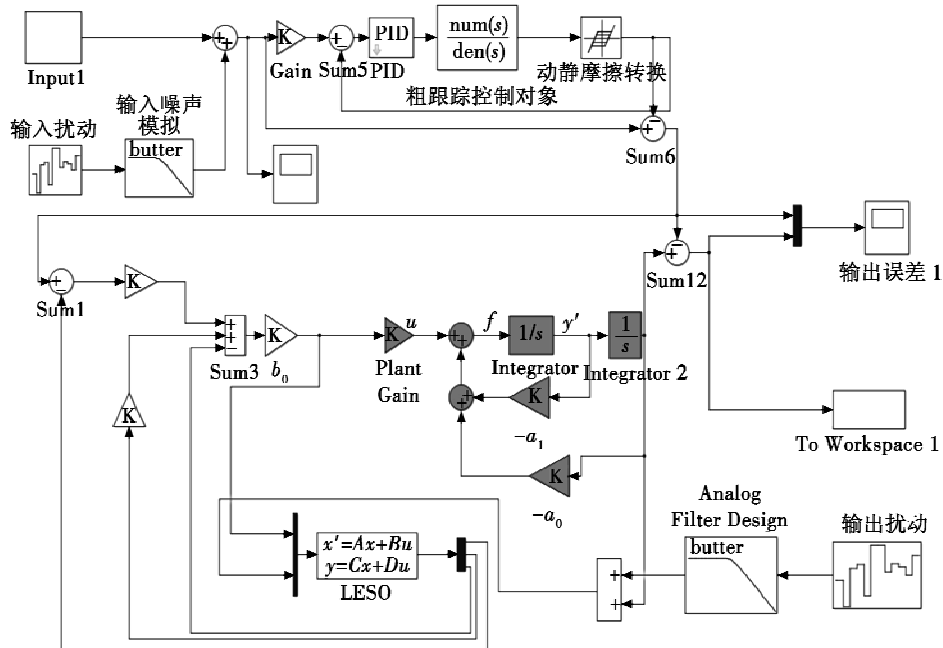


图7 Simulink 仿真结构

Fig. 7 Simulation structure of Simulink

在参数整定的过程中发现:当 ω_c 值固定, ω_o 增大时(分别取值为 $\omega_o = 3\omega_c, \omega_o = 4\omega_c, \omega_o = 5\omega_c$), 出现了性能的改变,其性能变化如图 8 所示。

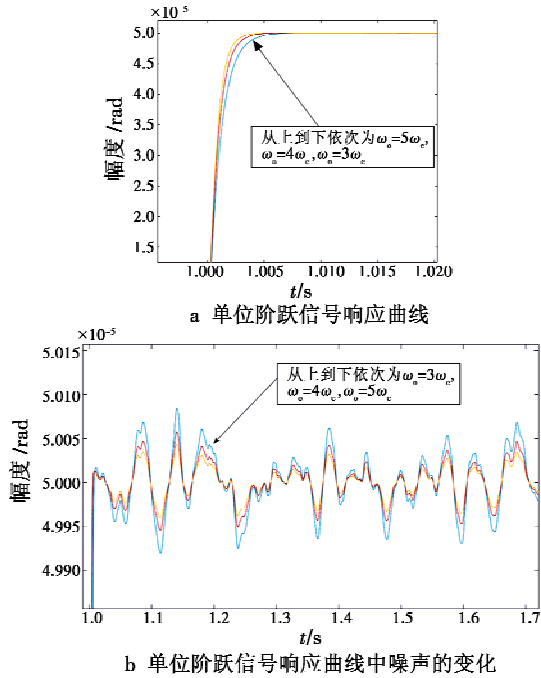


图 8 单位阶跃信号下的性能变化

Fig. 8 Performance changes under unit step signals

如图 8a 所示,随着 ω_o 的增大,系统的阶跃响应曲线的快速性得到了提高;但是系统的噪声放大作用出现了明显增大(如图 8b 所示),从而对应了上文结论。所以针对系统所要求的性能对 ω_o 进行适当增大,可以提升系统的控制精度,但是,随之而来的问题就是噪声的放大作用,所以需要在性能和噪声抑制之间找到一个合适的 ω_o 值。

针对输入端扰动将自抗扰控制方法与传统 PID 控制方法做对比,图 9 所示为自抗扰控制方法在正弦输入分别为 30 Hz, 50 Hz, 70 Hz, 90 Hz 频率下的控制误差结果。

在正弦输入分别为 30 Hz, 50 Hz, 70 Hz, 90 Hz 频率下 PID 控制的控制误差结果如图 10 所示。

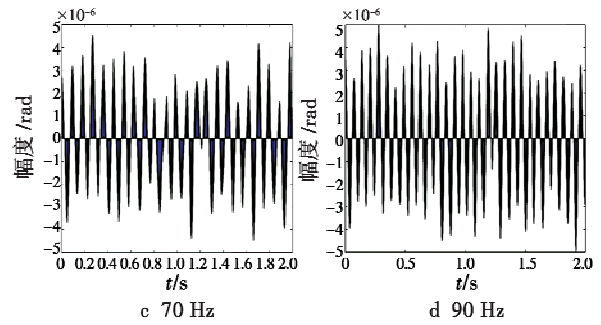
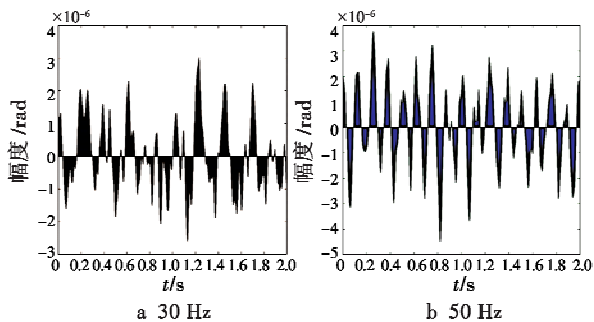


图 9 ADRC 控制策略在不同输入频率下的控制误差

Fig. 9 Control error of ADRC control strategy under different input frequencies

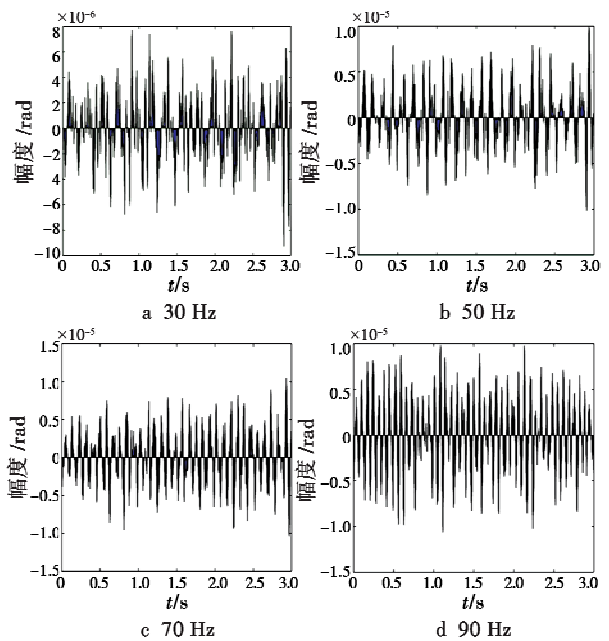


图 10 PID 控制方法在不同输入频率下的控制误差

Fig. 10 Control error of PID control method under different input frequencies

从仿真结果可以发现,在空间光通信 APT 系统的精跟踪部分,自抗扰控制策略相比传统的 PID 控制方法具有更高的控制精度,尤其是输入频率在 30 Hz 时,自抗扰控制策略的精度可达 $3 \sim 4 \mu\text{rad}$,而传统的 PID 方法误差则在 $8 \mu\text{rad}$ 以上,可以明显看出自抗扰控制策略的优势所在。

3 总结

本文简述了线性自抗扰控制策略,并将该策略应用在空间光通信 APT 系统的精跟踪部分上,针对精跟踪系统的数学模型对线性自抗扰控制策略的参数进行了一系列调整,并在加入模拟噪声后对线性自抗扰控

(下转第 111 页)

- [3] 汪亚顺,张春华,陈循. 仿真基加速寿命试验优化设计方法研究[J]. 宇航学报,2006,27(4):755-760.
- [4] TSENG S T, YU H F. A termination rule for degradation experiments [J]. IEEE Transactions on Reliability, 1997, 46(1):130-133.
- [5] WU S J, CHANG C T. Optimal design of degradation tests in presence of cost constraint[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2002, 76(2):109-115.
- [6] YU H F, TSENG S T. Designing a degradation experiment [J]. Naval Research Logistics, 1999, 46(6):689-706.
- [7] YU H F, TSENG S T. Designing a degradation experiment with a reciprocal Weibull degradation rate[J]. Quality Technology & Quantitative Management, 2004, 1(1):47-63.
- [8] 王浩伟,滕克难,盖炳良,等. 基于加速因子不变原则的加速退化试验优化设计方法:中国,106991074[P]. 2017-07-28.
- [9] 汪亚顺,张春华,陈循,等. 仿真基混合效应模型加速退化试验方案优化设计研究[J]. 机械工程学报, 2009, 45(12):108-114.
- [10] 潘刚,梁玉英,吕萌,等. 步进加速寿命试验优化设计 Monte-Carlo 仿真[J]. 电光与控制,2013,20(4):77-80.
- [11] 谭源源,张春华,汪亚顺,等. 竞争失效场合仿真基加速试验优化设计方法[J]. 国防科技大学学报,2011, 33(2):130-135.
- [12] 罗赓,穆希辉,牛跃听,等. 竞争失效产品步降加速试验优化设计研究[J]. 中国测试,2016,42(6):95-99.
- [13] 葛蒸蒸,赵文晖,李玉伟. 基于非参数统计的加速退化试验优化设计[J]. 现代防御技术,2015,43(6):173-177,198.
- [14] 刘娟. 电连接器步进应力加速退化试验的研究[D]. 杭州:浙江大学,2013.
- [15] 孙权,冯静,潘正强. 基于性能退化的长寿命产品寿命预测技术[M]. 北京:科学出版社,2015.
- [16] 陈文华,程耀东. 对数正态分布时恒定应力加速寿命试验方案的优化设计[J]. 仪器仪表学报,1998,19(5):107-109.
- [17] 潘正强,孙权,冯静. 基于典型随机过程的加速退化建模与试验设计方法[M]. 长沙:国防科技大学出版社,2015:95-97.
- [18] 陈磊磊. 基于随机过程的电连接器加速退化试验优化设计与统计分析的研究[D]. 杭州:浙江理工大学,2017.

(上接第 51 页)

制策略的扰动抑制做了分析和仿真。通过实验证明,自抗扰控制策略应用在空间光通信 APT 系统上,系统自身的噪声抑制性能有较大的提升,相比传统的 PID 方法,其控制精度得到了进一步提高,具有一定的实用价值。

参考文献

- [1] 黄海波,左韬,陈晶,等. 复合轴精跟踪系统伺服带宽的优化设计[J]. 红外与激光工程,2012,41(6):1561-1565.
- [2] 丁科,黄永梅,马佳光,等. 快速反射镜的误差自适应前馈复合控制[J]. 中国激光,2011,38(7):184-189.
- [3] 韩京清. 自抗扰控制技术[J]. 前沿科学,2007(1):24-31.
- [4] HAN J Q. From PID to active disturbance rejection control [J]. Proceedings of IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2009, 56(3):900-906.
- [5] 崔宁,陈兴林,曹开锐,等. 空间光通信精跟踪系统的模糊自抗扰控制[J]. 光学精密工程,2015,23(5):1394-1400.
- [6] 杨东,毛耀,丁科,等. 模型参考算法在快速反射镜中的应用[J]. 红外与激光工程,2013,42(10):2790-2795.
- [7] 董冉,艾勇,肖永军,等. 自由空间光通信精跟踪系统设计及其通信实验[J]. 红外与激光工程,2012,41(10):2718-2722.
- [8] GAO Z Q. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning[C]//Proceeding of the American Control Conference, New York, 2003:4989-4996.
- [9] 吴琼. 自由空间激光通信 ATP 系统精跟踪控制技术研究[D]. 长春:长春理工大学,2008.
- [10] 张明月,杨洪波,章家保,等. 改进自抗扰控制谐波式电动舵机伺服系统[J]. 光学精密工程,2014,22(1):99-108.