

文章编号: 1003-501X(2007)12-0012-05

大口径光电望远镜风阻力矩自抗扰补偿研究

翟军红^{1,2}, 王红宣¹, 陈娟¹, 王萍^{1,2}

(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. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 光电望远镜口径超过 5m 以后, 应该补偿风阻力矩干扰, 以提高光电望远镜跟踪精度。本文首次将自抗扰控制器应用于光电望远镜的伺服系统中, 根据自抗扰控制器可以动态补偿系统模型扰动和外部扰动, 将作为负载扰动的风阻力矩归为外部扰动, 利用扩张观测器对包括风阻力矩的各项扰动进行观测和补偿。该方法能有效地抑制风阻力矩对系统的影响, 同时提高伺服系统速度环的响应速度, 减小了稳态误差且无超调。仿真结果表明, 具有自抗扰控制器的调速系统, 当随机风阻力矩在 $\pm 100\text{N}\cdot\text{m}$ 之间变化时, 系统稳态误差的均值为 $1.8\times 10^{-5}\text{rad/s}$, 标准差为 $9.87\times 10^{-4}\text{rad/s}$, 最大值约为 $5.7\times 10^{-3}\text{rad/s}$, 其抗扰性能明显优于 PID 调速系统。

关键词: 光电望远镜; 风阻力矩; 自抗扰控制器; 伺服系统

中图分类号: V556

文献标志码: A

Active disturbance rejection controller to compensate the wind disturbance for the optoelectronic telescope with large aperture

ZHAI Jun-hong^{1,2}, WANG Hong-xuan¹, CHEN Juan¹, WANG Ping^{1,2}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
the Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: When the aperture of telescope is larger than 5 meters, it is necessary to compensate the wind disturbances for ensuring the high precision of the telescope. Since Active Disturbance Rejection Controller (ADRC) can compensate model disturbances and external uncertainty disturbances, we apply ADRC to an optoelectronic telescope, in which the extended state observer is used to observe and compensate the disturbances including the wind disturbance, which belongs to the load disturbance of an external uncertainty disturbance. This method can restrain the effect of wind disturbance on system, quicken the response-speed of speed loop without over-shooting, and reduce the error of the steady state. Simulation results show that the mean error of speed loop based on ADRC is $1.8\times 10^{-5}\text{rad/s}$, standard deviation $9.87\times 10^{-4}\text{rad/s}$ and maximum error $5.7\times 10^{-3}\text{rad/s}$ if the wind disturbance is within $\pm 100\text{N}\cdot\text{m}$. Its anti-disturbance ability is better than that of speed loop based on PID controller.

Key words: optoelectronic telescope; wind disturbance; ADRC; servo system

引言

风阻力矩一直是影响大口径光电望远镜跟踪精度的关键因素。四十年前, 人们就开始用圆顶室来屏蔽掉风荷对望远镜的影响, 通过快速反射镜来校正风阻力矩引起的视轴误差。扰动补偿器对消除扰动误差的作用是显著的, 但如何准确地检测出风阻力矩仍是一个技术问题^[1]。随着现代控制理论的发展, 负载力矩观测器得到应用, 有效消除了外扰对系统的影响^[2]。用 Lyapunov 函数构造的基于等效负载扰动观测器的变

收稿日期: 2007-04-01; 收到修改稿日期: 2007-08-26

作者简介: 翟军红(1982-), 男(汉族), 山西阳泉人, 硕士, 主要研究工作是光电跟踪系统的仿真技术研究。E-mail: junhong0501@163.com

结构鲁棒控制器，对外界扰动和系统参数变化具有很好的控制效果^[3]。然而，这些方法的负荷扰动观测器是基于对象模型已知的条件下设计的，而实际系统模型并不能精确得到。基于自抗扰控制器设计的直流电动机调速系统^[4]，既不依赖于对象模型，又具有较强鲁棒性和抗干扰能力。

自抗扰控制是韩京清研究员及其合作者经过十几年的研究，提出的一种非线性控制律^[5]。其中采用了两项关键技术，一是通过易实现的非线性算法，对系统的状态以及状态的各阶微分进行跟踪控制；二是通过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。即自抗扰控制器控制了系统的状态，又控制了状态的各阶微分，同时还兼顾了扰动的动态补偿，因此使控制系统在稳定性和鲁棒性方面都有显著提高。本文描述了自抗扰控制器的结构及特点，并首次将其应用于某光电望远镜光电跟踪系统的速度环，以期提高系统的抗风阻力矩能力，通过仿真研究，得出其抗干扰性能明显优于 PID 调速系统的结论。

1 自抗扰控制器

自抗扰控制器(Active Disturbance Rejection Controller, ADRC)主要由非线性跟踪微分器(Tracking Differentiation, TD)、扩张状态观测器(Extended States Observer, ESO)和非线性状态误差反馈控制律(Nonlinear State Error Feedback, NLSEF)构成。以应用最广泛的二阶 ADRC 为例，其结构如图 1 所示。

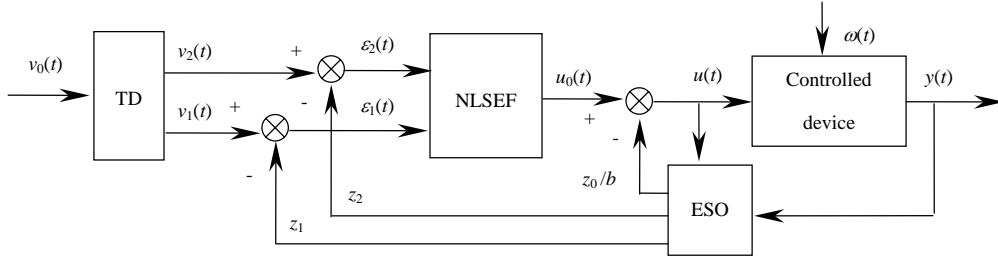


图 1 二阶自抗扰控制器的结构

Fig.1 Structure of second-order active disturbance rejection controller

非线性跟踪微分器(TD)的作用是控制过渡过程并给出此过程的微分信号，除了跟踪参考输入信号，设置预期动力学特性外，还柔化输入信号的变化，以减少控制过程输出的超调量。

扩张状态观测器(ESO)是自抗扰控制器的核心部分。系统含有的非线性动态、模型不确定性及外部扰动均可用“扩张状态观测器”进行实时观测并加以“补偿”。它把含有未知外扰的非线性不确定对象用非线性状态反馈化为“积分串联型”，它对一定范围的对象具有很好的适应性和鲁棒性。把系统化为“积分器串联型”以后，就能对它用“非线性状态误差反馈”设计出理想的控制器。在非线性状态误差反馈控制器中，由于扩张状态观测器能实时观测未知外扰和系统模型的实时作用而加以补偿，从而线性设计所需的内模原理和在常值扰动下为消除静差而采用的积分器都不再必要了。

在 ADRC 的设计过程中，为减小运算量，适用于工业上实时控制的场合，采用线性函数代替非线性函数^[6]，同样可以得到性能优良的控制器。借鉴李东海推荐的方法^[7]，设计非线性跟踪微分器(TD)为

$$\begin{cases} \dot{n}_1 = n_2 \\ \dot{n}_2 = -1.76rn_2 - r^2(n_1 - n_0) \end{cases} \quad (1)$$

式中： n_0 为给定输入； n_1 为对 n_0 安排的过渡过程； n_2 为对 n_0 的微分信号； r 为可调参数， r 越大跟踪速度越快。控制对象的实际输出线性扩张状态观测器(ESO)为

$$\begin{cases} e = z_1 - n \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_{01}e \\ \dot{z}_2 = z_3 - \beta_{02}e + b_0u \\ \dot{z}_3 = -\beta_{03}e \end{cases} \quad (2)$$

式中： n 为控制对象的实际输出； z_1 为对实际输出的状态估计； z_2 为实际输出的近似微分； z_3 为未知扰动的

估计值； u 为控制对象的输入； β_{01} ， β_{02} ， β_{03} 为可调参数。

非线性状态误差反馈控制律(NLSEF)为

$$\begin{cases} u_0 = k_1(z_1 - n_1) + k_2(z_2 - n_2) \\ u = u_0 - z_3/b \end{cases} \quad (3)$$

式中： k_1 、 k_2 、 b 为可调参数。

2 某光电望远镜伺服跟踪系统仿真及结果分析

光电跟踪系统风阻力矩扰动是随风力、仪器转速以及仪器转角等变化的一个随机量。风阻力矩干扰直接作用于系统速度环内，这里主要对速度环的抗干扰性进行仿真研究。采用的被控对象直流力矩电机参数为电气时间常数 $T_l=0.013s$ ，机电时间常数 $T_m=1.25s$ ，反电动势系数 $C_e=1.4V \cdot s/rad$ 。设计的 PID 控制器传递函数为

$$G(s) = \frac{500(0.45s+1)(0.013s+1)}{(1.35s+1)(0.006s+1)} \quad (4)$$

被控对象为二阶对象，所以采用二阶的自抗扰控制器，根据式(1)、式(2)、式(3)分别建立 TD、ESO、NLSEF 的仿真模块，参数选取如下： $r=200$ ， $\beta_{01}=1.0 \times 10^4$ ， $\beta_{02}=0.5 \times 10^9$ ， $\beta_{03}=0.8 \times 10^4$ ， $k_1=1.0 \times 10^3$ ， $k_2=10$ ， $b=1$ 。在 MATLAB 6.5.0 的 Simulink 仿真环境中建立仿真模型，如图 2 所示。

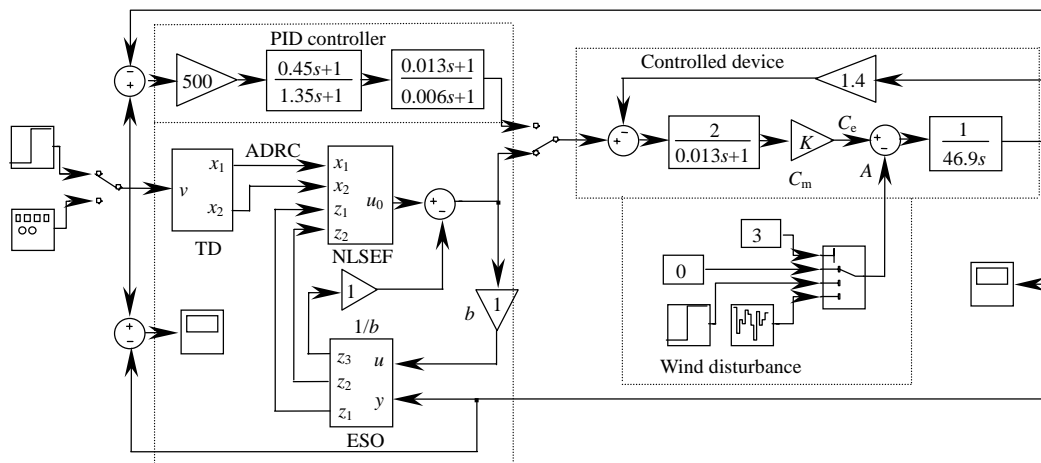


图 2 速度环仿真模型

Fig.2 Simulation model of speed loop

图 3 分别是 r 取 10, 20, 40, 60 时的 ADRC 调速系统阶跃响应曲线，说明了 ADRC 调速系统可以通过调整 r 的取值，来控制过渡过程， r 越大跟踪速度越快。图 4 是 PID 调速系统和 ADRC 调速系统的阶跃响应，这里取 $r=200$ ，明显看出 ADRC 调速系统有无超调、快速响应的特点。PID 调速系统在阶跃输入作

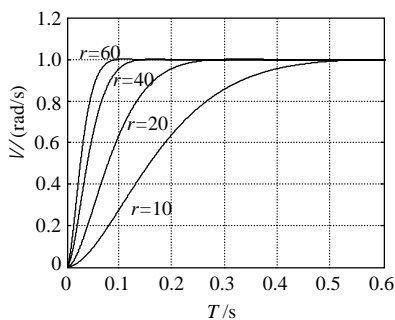


图 3 r 取不同值时 ADRC 调速系统的阶跃响应

Fig.3 Step response of the speed loop based on ADRC with different r value

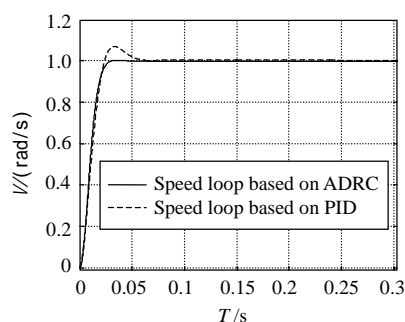


图 4 ADRC 调速系统和 PID 调速系统阶跃响应对比

Fig.4 Comparison of step response of the speed loop based on ADRC and PID

用下的稳态误差约为 $2.79 \times 10^{-3} \text{ rad/s}$ ，ADRC 调速系统在阶跃输入作用下的稳态误差约为 $1.4 \times 10^{-3} \text{ rad/s}$ 。可得出 ADRC 调速系统的稳态误差小于 PID 调速系统的。通过上述仿真试验，得出 ADRC 调速系统在动态性能和稳态性能方面都优于 PID 调速系统。ADRC 调速系统具有更快的响应速度，且无超调、无振荡和更高的稳态精度，这是由于 ADRC 中 TD 控制过渡过程，ESO 对未知扰动进行准确地观测和补偿的结果。

在阶跃输入，同时在 0.5s 时加入阶跃干扰 $100 \text{ N}\cdot\text{m}$ 下，ADRC 调速系统的速降 0.003 rad/s ，最大速降 0.005 rad/s ，调整时间 0.025 s 。而 PID 调速系统的速降 0.011 rad/s ，最大速降 0.024 rad/s ，调整时间 1.15 s ，如图 5。当负载扰动突变时，ADRC 调速系统比 PID 调速系统具有更小的转速变化和更快的恢复时间，说明 ADRC 对负载扰动具有良好的鲁棒性。

系统在扰动作用下的稳态误差大小反映了系统的抗干扰能力的强弱。假设风阻力矩为 $\pm 100 \text{ N}\cdot\text{m}$ 之间变化的随机量。在阶跃输入，同时加入 $\pm 100 \text{ N}\cdot\text{m}$ 之间变化的风阻力矩的作用下，ADRC 调速系统的稳态误差均值为 $1.8 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$ ，标准差为 $9.87 \times 10^{-4} \text{ rad/s}$ ，最大值约为 $5.7 \times 10^{-3} \text{ rad/s}$ 。而 PID 调速系统稳态误差均值为 $2.8 \times 10^{-3} \text{ rad/s}$ ，标准差为 $4.2 \times 10^{-3} \text{ rad/s}$ ，最大值约为 0.0194 rad/s 。数据比较后得出 ADRC 调速系统比 PID 调速系统对风阻力矩有更好的控制效果，说明 ADRC 调速系统比 PID 调速系统对负载突变和负载扰动具有更强的控制效果和鲁棒性。

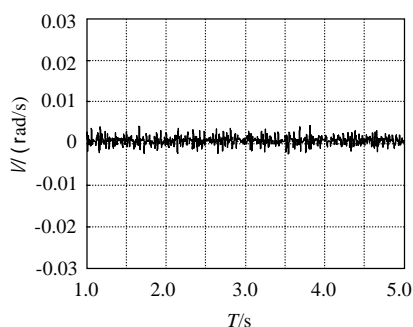


图 6 在风阻力矩扰动下 ADRC 调速系统的稳态误差

Fig.6 Steady-state error of the speed loop based on ADRC under wind disturbance

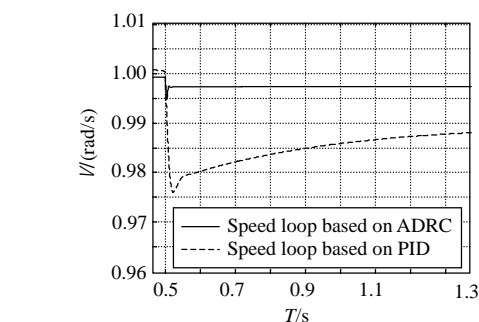


图 5 在阶跃干扰下 ADRC 调速系统和 PID 调速系统的速降对比

Fig.5 Comparison of speeds with the speed loop based on ADRC and PID in the condition of step disturbance

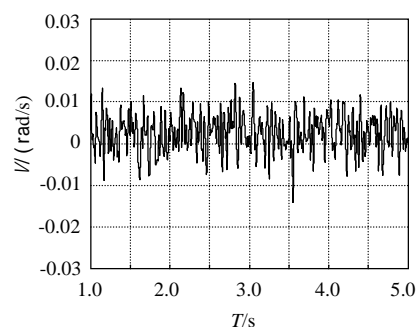


图 7 在风阻力矩扰动下 PID 调速系统的稳态误差

Fig.7 Steady-state error of the speed loop based on PID under wind disturbance

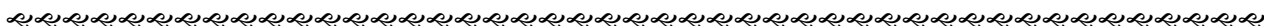
3 结 论

通过仿真结果可以看出，自抗扰控制器成功的应用于速度回路的设计中，使速度环具有更强的抗干扰能力，和更好的鲁棒性，同时使位置环的设计更简便。也可以将自抗扰控制器应用于位置环的设计中，用来提高整个光电跟踪伺服系统的抗干扰性，鲁棒性。

参考文献：

- [1] 杨文淑，张以谟，马佳光. 扰动跟踪控制系统设计与仿真[J]. 光电工程，2002，29(2)：10-12.
YANG Wen-shu, ZHANG Yi-mo, MA Jia-guang. Design and Simulation for Disturbance Tracking and Control System [J]. Opto-Electronic Engineering, 2002, 29(2)：10-12.
- [2] 杨 钧. 带负载力矩补偿观测器的直流调速系统[J]. 广东工业大学学报，2006，23(2)：59-62.
YANG Jun. Speed Control System of DC Motor with Load Torque Compensation [J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2006, 23(2)：59-62.

- [3] 方一鸣, 王 乐, 王益群, 等. 基于等效负载扰动观测器的直流电机转速鲁棒控制[J]. 电机与控制学报, 2002, 6(4): 297-300.
FANG Yi-ming, WANG Le, WANG Yi-qun, et al. The robust speed control of a DC motor based on the equivalent load observer [J]. **Electric Machines and Control**, 2002, 6(4): 297-300.
- [4] 马冰雪. 具有不确定性参数的直流电机转速自抗扰控制器设计[J]. 电气传动, 2006, 36(2): 30-33.
MA Bing-xue. Design of Active Disturbance Rejection Controller for DC Motor Speed System with Uncertainty Parameters [J]. **Electric Drive**, 2006, 36(2): 30-33.
- [5] 韩京清. 从 PID 技术到“自抗扰控制”技术[J]. 控制工程, 2002, 9(3): 13-18.
HAN Jing-qing. From PID Technique to Active Disturbances Rejection Control Technique [J]. **Control Engineering of China**, 2002, 9(3): 13-18.
- [6] 赵习为. 自抗扰控制器的简易实现[J]. 制造业自动化, 1999, 21(6): 52-53.
ZHAO Xi-wei. Simple Implementation of the Auto Disturbance rejection controller [J]. **Manufacturing Automation**, 1999, 21(6): 52-53.
- [7] 李东海, 姜学智, 徐忠净, 等. 一类不可逆系统的非线性控制及预期动力学方程的选取[J]. 控制与决策, 1998, 18(6): 686-689.
LI Dong-hai, JIANG Xue-zhi, XU Zhong-jing, et al. Nonlinear Control of a Class of Non-inverse System and Choice of Desired Dynamical Equations [J]. **Control and Decision**, 1998, 18(6): 686-689.
- [8] 邵立伟, 廖晓钟, 张宇河, 等. 自抗扰控制器在永磁同步电机控制中的应用[J]. 北京理工大学学报, 2006, 26(4): 326-329.
SHAO Li-wei, LIAO Xiao-zhong, ZHONG Yu-he, et al. Active Disturbance Rejection Controller Scheme for Permanent Magnetic Synchronous Motor [J]. **Transactions of Beijing Institute of Technology**, 2006, 26(4): 326-329.
- [9] 黄 一, 张文革. 自抗扰控制器的发展[J]. 控制理论与应用, 2002, 19(4): 485-492.
HUANG Yi, ZHANG Wen-ge. Development of Active Disturbance Rejection Controller [J]. **Control Theory and Applications**, 2002, 19(4): 485-492.
- [10] 于希宁, 朱丽玲. 自抗扰控制器的动态参数整定及其应用[J]. 华北电力大学学报, 2005, 32(6): 9-13.
YU Xi-ning, ZHU Li-ling. Dynamic parameter setting and application of active disturbance rejection controller [J]. **Journal of North China Electric Power University**, 2005, 32(6): 9-13.
- [11] Pottebaum Tait S, MacMynowski Douglas G. Wind tunnel testing of a generic telescope enclosure [J]. **SPIE**, 2004, 5495: 270-281.
- [12] Cho Myung K, Stepp Larry M, Angeli George Z, et al. Wind loading of large telescopes [J]. **SPIE**, 2003, 4837: 352-367.
- [13] Sobek Robert D. Mitigating wind induced telescope jitter [J]. **SPIE**, 2005, 5810: 1-10.



本期组稿：陈伟明
责任编辑：杨淇名
英文编辑：庞 洪
标 引：曹 强