

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.03.046

基于改进自抗扰光电稳定平台视轴控制

李前位,邱亚峰,刘康,严小虎,田浩杰

(南京理工大学 机械学院,江苏 南京 210094)

摘 要:在研究海上光电平台中,对视轴稳定性提出了快速性、稳定性要求,而采用自抗扰非线性研究方式比较复杂。为降低研究的复杂程度,进行线性化处理,并引入已知部分模型信息以及对线性化自抗扰进行优化,设计一种改进型的线性自抗扰控制器。通过 Simulink 进行仿真,对比简化前后的线性自抗扰控制发现,改进后的自抗扰控制相比于线性控制情况下响应速度提高了 84.6%,优化后的线性自抗扰控制无明显震荡与超调,系统的抗干扰能力也得到提高,具有鲁棒性。

关键词:光电稳定平台;自抗扰;线性控制;视轴控制

中图分类号:TP273 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2025)03-0242-04

Visual-axis-controlled Optoelectronic Stabilization Platform Based on Improved Active Disturbance Rejection

LI Qianwei, QIU Yafeng, LIU Kang, YAN Xiaohu, TIAN Haojie

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: The study of offshore optoelectronic platform requires the rapidity and stability of optic axis, but encounters complexity by the method of auto-disturbance rejection nonlinear. To alleviate the complexity, linearization is proposed. The known part of the model information is introduced, the linearized active disturbance rejectand is optimized, and an improved linear active disturbance rejection controller is designed. Through Simulink simulation, and in comparison with the simplified linear active disturbance rejection control, it is found that the response speed of improved LADRC is increased by 84.6% compared with that of linear control, and the anti-interference ability is also improved with robustness.

Keywords: optoelectronic stabilization platform; active disturbance rejection; linear control; visual axis control

0 引言

海上目标探测采用浮标作为载体,上方搭载光电稳定平台,用来对范围内的目标进行定位,进而获取目标图及相关位置参数。由于海洋中存在随机波浪与海风,导致获取数据不够精确,因此提升光电稳定平台的精度尤为重要^[1-3]。而采用传统的 PID 控制,虽然结构简单,稳定可靠,但是很难满足如今精度越来越高的设备要求^[4-5]。光电稳定平台控制的研究者采用非线性研究可以获得较为满意的结果,但是过于复杂,研究周期较长,不适用于复杂多变的情况^[6-8],因此本文采用自抗扰研究,首先非线性研究线性化处理降低了难度,其次引入模型信息,并对观测器进行优化,以此改进扩张状态观测器的设计,对比普通线性研究改进后线性自抗扰的优越性突出。

1 自抗扰控制的策略

1.1 自抗扰控制技术

韩京清研究员在对传统经典的 PID 进行研究,发现 PID 简单实用,已大量用于如今的工业场所,但在如今的高精度以及复杂系统上很难适应。因此韩教员吸取了现代控制中的优秀成果,同时避免了现代控制的复杂系统。随着计算机的高速发展,仿真技术得到进一步的发展,最终其提出了一种新型的更加实用以及精度高的自抗扰控制技术 (active disturbance rejection control, ADRC)^[9-10],将所有不确定的内外因素都归结到系统的总扰动,进而给予估计和补偿^[11]。

跟踪微分器用于对初始信号的检测与反馈,扩张状态观测器 (extended state observer, ESO) 用于估计总扰动并进行实时补偿,非线性状态误差

基金项目:国防预研基金项目(1171011485)

第一作者简介:李前位(1996—),男,江苏连云港人,硕士研究生,研究方向为光机电设计,1399251069@qq.com。

反馈率依据 ESO 对系统的扰动估计补偿误差获得新的控制量,以上 3 个部分共同组成了自抗扰控制器^[12-13],核心思想在于把控制系统中建模不精确的部分与外部、内部干扰全部作为扰动的部分,利用 ESO 对总体扰动实时估计和在线补偿。自抗扰控制器的原理结构如图 1 所示。

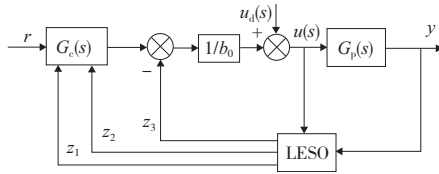


图 1 自抗扰控制器的原理结构图

1.2 跟踪微分器

跟踪微分器 (TD) 是对原始信号进行信号预处理,可以解决测量信号中的不连续问题或者信号之中伴随噪声的问题,它可以行之有效地提取连续信号 (跟踪给定) 和微分信号,从而提高系统的准确性、稳定性^[14]。TD 的一般形式如下:

$$\begin{cases} u(k) = \text{fst}(x_1(k) - v(k), x_2(k), r_0, h_0) \\ x_1(k+1) = x_1(k) + h \cdot x_2(k) \\ x_2(k+1) = x_2(k) + h \cdot u(k) \quad |u(k)| \leq h \end{cases} \quad (1)$$

式中: $u(k)$ 为离散的最速微分综合函数形式; v 为 TD 输入; $\text{fst}(x_1, x_2, r_0, h_0)$ 是最快速度控制函数; r_0 为决定输入信号跟踪速度的速度因子; x_1 为 v 的跟踪; x_2 为 x_1 的微分; h 为受控对象的采样周期; h_0 为 $\text{fst}()$ 函数的步长,取值为 h 的整数倍。

1.3 扩张状态观测器

扩张状态观测器 (ESO) 是自抗扰控制中的最重要部分,也是设计最需要考虑研究的部分,它的核心思想是将内外部扰动整合为系统的总扰动,通过 ESO 的扩张作用将此部分变为新的状态观测变量,利用 ESO 的估计总扰动进行有效的补偿^[15]。ESO 的控制形式如下:

$$\begin{cases} e = Z_1 - y \\ \dot{Z}_1 = Z_2 - \beta_1 e \\ \dot{Z}_2 = Z_3 - \beta_2 \text{fal}(e, \alpha_1, \delta) + bu \\ \dot{Z}_3 = -\beta_3 \text{fal}(e, \alpha_2, \delta) \end{cases} \quad (2)$$

其中非线性函数 $\text{fal}()$ 的表达式如下:

$$\text{fal}(e, \alpha, \delta) = \begin{cases} |e|^\alpha \text{sign}(e) & |e| > \delta \\ e/\delta^{1-\alpha} & |e| \leq \delta \end{cases} \quad (3)$$

式中: e 是跟踪误差; b 是系统的增益; u 是控制率; Z_1 为系统输出信号的估计; Z_2 为系统输出信号微分的估计; Z_3 为系统总扰动的估计。上述公式与 2 阶系统而言, ESO 为 3 阶系统, β_1 、 β_2 、 β_3 为观测器增益系数; δ 、 α_1 、 α_2 为函数 $\text{fal}(e, \alpha, \delta)$ 的参数。

1.4 非线性状态误差反馈率

非线性状态误差反馈控制率 (NLSEF) 的组合形式是一种非线性的,它的输入是跟踪微分器 (TD) 的输出和 ESO 状态估计值的差。再依据 ESO 对系统的扰动估计补偿误差,进而获得新的控制量^[16]。

2 改进自抗扰

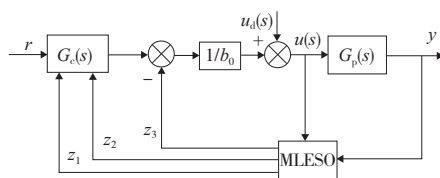
上述非线性自抗扰算法虽然可以有效提高系统中的控制精度,但是它引入许多的控制参数,导致研究中参数的调节变得十分困难,很难实现理论上的效果,且在实际工程中的困难很多,结果多是差强人意^[17]。因此,本文采用线性控制方法来简化控制中众多的参数整定问题。实验结果表明,采用线性控制方法,结果能达到目标要求,同时大大缩短了研究时间,降低了工程成本。

在 LADRC 中舍弃了 TD, ESO 进行线性化获得线性扩张状态观测器 (linear extended state observer, LESO), 其中的参数和观测器中带宽有关,利用极点配置方法使得参数降低为 1 个。控制器采用 PD (proportional-derivative) 控制组合使得控制器的正定难度大幅降低。线性化控制中的参数由原来的 12 个降低到了 3 个,分别是控制带宽、观测器的带宽、控制的输入增益。

在线性化自抗扰控制中, LESO 直接影响控制的结果,因此基于此需进行改进优化。

LESO 是定义一个扩张状态,利用系统输入输出观测总扰动进而补偿。在被控对象可以获得的情况下,将这部分信息引入到 LESO 中,降低了 LESO 的观测时间,进而提高了控制精度与效率。

为了简化控制律的设计,采用传统的 PID 组合控制来设计,同时舍去抑制扰动的积分器获取 PD 控制器。将已知模型数据加载到观测器获得 MLESO, 控制器采用 PD 控制器,得到图 2 基于模型信息改进的线性化自抗扰控制器 (MLADRC)



3 光电稳定平台

本文选用两轴两框架结构^[18],满足较小负载以及精度高的要求,系统的组成部分主要包括方位框架结构系统、伺服控制系统、俯仰框架结构系统。伺服控制系统主要包括陀螺仪、直流力矩电机、旋转变压器、PWM 功率放大器等。陀螺仪作为测量惯性角速度的元件,用来测量方位轴与俯仰轴的速度信息与角度信息;旋转变压器用于测量俯仰框架和方位框架之间的旋转角度。由基座、轴承与机械框架共同组成平台的结构。基座用于连接浮标载体与光电平台,基座安装减震器,初步降低平台带来的扰动^[19]。平台的外形采用圆形结构以此来降低海面上风浪的扰动^[20-21]。各个部分的相互作用,共同保证了平台系统的稳定,以便获取敌舰的可靠图像。图 3 为光电稳定平台结构示意图。

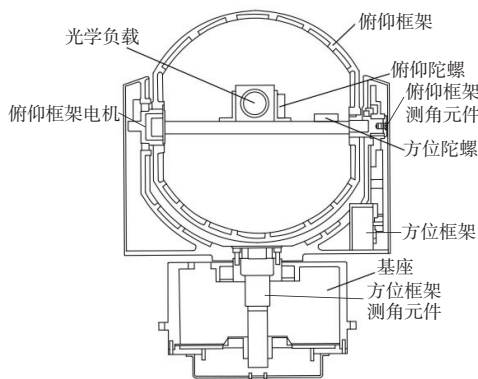


图3 光电稳定平台结构示意图

根据各个部分选择的型号来确定被控对象的模型,功率放大器当作比例环节,其传递函数定义为 $K_s = 1.5$,电机部分选择结构较为简单的直流力矩电机,结合选择的电机参数,获得电机和平台负载的传递函数,即光电平台俯仰轴传递函数式:

$$G_p(s) = \frac{11.4682}{0.03927s^2 + 0.457126s + 1} \quad (4)$$

螺传递函数可以简化为比例环节,定义传递函数 K_e ,取值为 0.02。为了预防外界的干扰对陀螺的信号影响,加入一个低通滤波器,带宽为 0.001。

4 仿真实验分析

为了验证 MLADRC 的控制效果,对上述的光电稳定平台进行实验效果分析,通过在 Matlab 的 Simulink 仿真模块中进行实验仿真,与 LADRC 进行对比。将阶跃信号输入到系统里,获得 MLADRC、LADRC 的阶跃响应局部放大如图 4 所示。

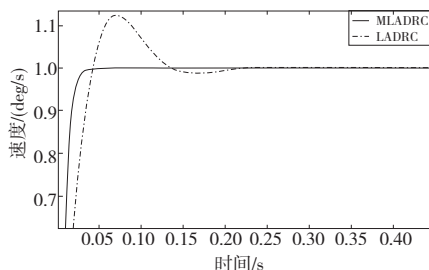


图 4 局部放大阶跃曲线

在 MLADRC 平台中,发现其中没有超调与震荡的现象,系统在 0.039 s 反应时间迅速进入了稳态,但是 LADRC 有明显的震荡与超调现象,超调量为 11.45%,系统在 0.25 s 进入了稳态,对比说明 MLADRC 响应速度提升了 84.4%。表 1 为两种控制系统的动态性能参数。

表 1 动态性能参数表

相关参数	LADRC	MLADRC
上升时间/s	0.05	0.039
峰值时间/s	0.08	0
调节时间/s	0.25	0.039
超调量/%	11.45	0

5 结语

本文选取光电稳定平台作为研究对象, 对抗扰控制进行研究, 由于非线性的研究比较复杂, 因此采用线性进行简化研究, 同时结合已知模型信息来降低观测器的负担, 提高了观测效率。对线性扩张状态观测器、控制器进行优化, 将 LADRC 与 MLADRC 进行了仿真对比, 推导出了以下结论: MLADRC 控制明显优于 LADRC 控制。MLADRC 控制不但稳定时间极大地缩短, 而且也不会出现 LADRC 控制中的超调现象, 具有更好的抗干扰性与鲁棒性。

