

引用格式:王春阳,彭业光,史红伟,等.光电稳定平台线性自抗扰控制器设计[J].电光与控制,2018,25(11):112-115,119. WANG C Y, PENG Y G, SHI H W, et al. Design of a linear disturbance rejection controller for photoelectric stabilized platform[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(11): 112-115, 119.

光电稳定平台线性自抗扰控制器设计

王春阳, 彭业光, 史红伟, 辛瑞昊, 张 硕
(长春理工大学, 长春 130022)

摘要:为提升光电稳定平台的快速响应和扰动抑制能力,设计了基于平台模型的线性自抗扰控制器。通过系统辨识的方法,获取光电稳定平台的近似模型,然后将获取的模型信息加入到扩张状态观测器设计中,进行线性自抗扰控制器的设计,并与未采用模型信息的线性自抗扰控制器进行仿真对比。仿真结果表明:基于平台模型信息设计的线性自抗扰控制器可有效提高光电稳定平台的响应速度和扰动抑制能力。

关键词:光电稳定平台; 模型信息; 线性自抗扰控制器; 扰动抑制

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2018.11.022

Design of a Linear Disturbance Rejection Controller for Photoelectric Stabilized Platform

WANG Chun-yang, PENG Ye-guang, SHI Hong-wei, XIN Rui-hao, ZHANG Shuo
(Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: In order to quicken the response speed and improve the disturbance rejection ability of the photoelectric stabilized platform, a Model-based Linear Active Disturbance Rejection Controller (MLADRC) was proposed. The approximate model of the photoelectric stabilized platform was obtained by using the method of system identification. The acquired model information was added to the design of Extended State Observer (ESO), and then MLADRC was designed. A comparison was conducted with LADRC, designed not using the model information. The simulation results show that MLADRC has better control performance and can effectively improve the response speed and disturbance rejection ability of the photoelectric stabilized platform.

Key words: photoelectric stabilized platform; model information; linear active disturbance rejection controller; disturbance rejection

0 引言

光电稳定平台是惯性导航、制导及测量系统的核心设备,一般由光电载荷、框架系统、驱动与控制系统等装置构成。其所搭载平台的运动及抖动会造成平台视轴的不稳定,影响其所搭载的光电探测设备的成像质量。光电稳定平台系统内部也存在复杂的干扰因素,如机械谐振、轴系摩擦力矩、传感器噪声等,这些都会对视轴稳定精度造成不利影响。

随着现代技术的发展、目标机动性能的增强,对光

电稳定平台要求越来越高,不仅要求其具有更快的响应速度、更好的稳定精度,还要具备抑制大范围扰动的能力。因此,常规的控制策略已难以满足要求,急需寻找新的方法以提高系统的性能。国内外的科技工作者在提高光电稳定平台性能方面对控制策略进行了深入研究。文献[1-2]提出采用高斯型RBF神经网络对摩擦进行观测和补偿的方法;文献[3]针对稳定平台中的非线性扰动,采用LQG和Kalman滤波算法对扰动进行实时估计和补偿;文献[4]采用了基于神经网络的状态观测器并依据完全补偿原理设计陀螺平台控制系统。但是这些方法往往设计难度较大,计算复杂,控制系统成本较高,限制了其在实际工程中的推广和应用。

自抗扰控制技术(Active Disturbance Rejection Control, ADRC)是一种基于“主动抗扰”思想开发的新型实用控制技术,它设计简便,不依赖于系统的数学模型,通

收稿日期:2017-12-08

修回日期:2017-12-23

基金项目:吉林省科技发展计划项目(20160101279JC)

作者简介:王春阳(1964—),女,吉林长春人,博士,教授,博导,研究方向为鲁棒分数阶控制、自抗扰控制。

过扩张状态观测器分析系统的输入和输出信息来提取系统中的扰动信息^[5-6]。线性自抗扰控制技术 (Linear ADRC, LADRC)^[7]以线性化方式设计各结构,需整定参数较少,十分便于工程应用,已在精密车床中快速刀具系统伺服控制、微机电传感器、航天器姿态控制领域取得了很大成功^[8]。文献[9]将线性自抗扰控制技术应用于光电平台稳定回路控制,有效提高系统的稳定精度。

虽然自抗扰控制不依赖被控对象模型的数学模型,但是对于某些系统,可通过一些手段获得被控对象的部分模型信息^[10]。将这些模型信息加入到 LESO 设计中,降低 LESO 的观测负担,在不提高观测器带宽的情况下提高对抗动的观测精度,提升控制效果,同时避免过多噪声进入系统^[11]。

本文以某两轴两框架机载光电稳定平台为研究对象。首先对系统结构做简要说明,通过系统辨识,获得其数学模型,然后开展了基于平台模型的线性自抗扰控制器 (Model-based LADRC, MLADRC) 设计工作,最后与未采用模型信息的线性自抗扰控制器进行仿真对比,仿真结果表明了该方法的有效性。

1 光电稳定平台结构及模型

1.1 光电稳定平台结构

图 1 所示的两轴两框架结构的光电稳定平台是目前应用较多且技术较为成熟的一种。该结构是将光电载荷等侦察设备安装在俯仰框架上,陀螺和旋转变压器分别为测速和测角元件。

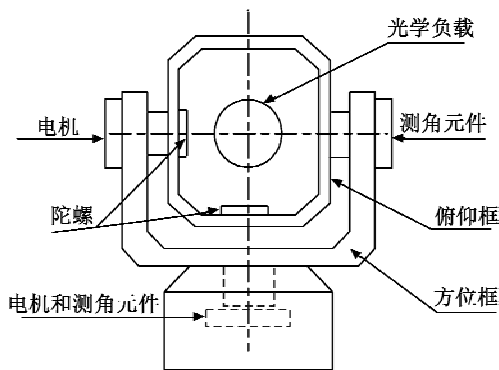


图 1 光电稳定平台结构

Fig. 1 Structure of photoelectric stabilized platform

图 2 是光电稳定平台单轴稳定回路控制框图。主要结构包括功率放大器、电机及负载、陀螺、旋转变压器和控制器。

光电稳定平台控制系统由速度内环和位置外环构成。外环通过旋转变压器检测转塔当前位置与输入指令的偏差;内环通过陀螺检测空间角速度。二者均对机动平台的载体角运动有隔离作用,但位置环带宽较窄,只能隔离极低频率的扰动,系统中起主要隔离作用

的是速度环,且速度环控制通常比位置环更迅速、有效,因此改善速度环动态特性是提升系统性能的关键。

方位轴和俯仰轴互相正交,所以它们之间的耦合作用基本可以忽略,且它们的控制过程基本相同,所以取方位轴的速度环作为控制研究对象。

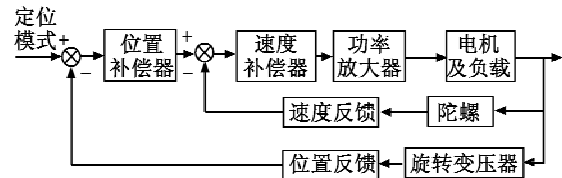


图 2 单轴稳定回路控制框图

Fig. 2 Diagram of a single-axis stabilization loop

1.2 光电稳瞄系统模型

光电稳定平台是包含有很多非线性因素的复杂系统,难以通过机理分析的方法对模型进行准确描述,因此利用系统辨识的方法根据实测的输入输出数据进行模型参数辨识。具体是将正弦扫频信号作为系统输入,求出平台在不同频率段的响应特性,然后通过最小二乘法辨识求取系统的频率特性。平台方位轴频率特性曲线如图 3 所示。

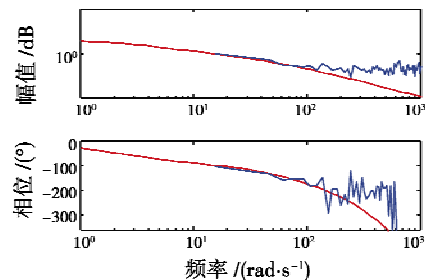


图 3 方位轴频率特性曲线

Fig. 3 Frequency curve of direction axis

通过对频率特性进行拟合和辨识,可得方位轴的传递函数为

$$G_{tw}(s) = \frac{7.81}{0.0061s^2 + 0.569s + 1} \quad (1)$$

2 基于平台模型的线性自抗扰控制器设计

基于平台模型的线性自抗扰控制器设计包括包含模型信息的线性扩张状态观测器 (Model-based LESO, MLESO) 设计和 PD 控制器设计。

2.1 MLESO 设计

式(1)的方位轴传递函数写成微分方程的形式为

$$\ddot{y} = -94\dot{y} - 164y + 1280u + w \quad (2)$$

式中: y 和 u 分别为系统的输出和输入; w 为未知的外部扰动,则式(2)又可写成

$$\ddot{y} = -94\dot{y} - 164y + (1280 - b_0)u + b_0u + w \quad (3)$$

式中, b_0 为输入增益的近似估计,为可调参数。

未利用模型信息的 LESO,需要估计的总扰动为 $f = -94\dot{y} - 164y + (1280 - b_0)u + w$ 。利用模型信息的 MLESO 需要估计的总扰动 $f' = (1280 - b_0)u + w$ 。通过比较 f 和 f' 可看出,采用 MLESO 时,系统的部分内部扰动 $-94\dot{y} - 164y$ 不需要被估计。这样就减少了需要估计的扰动,降低了观测器的观测负担。

选取状态变量 $\dot{x}_1 = y, \dot{x}_2 = \dot{y}$,将总扰动 f 扩展为系统的状态变量 $x_3 = f$,未包含模型信息的式(3)系统扩张状态方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 + b_0u \\ \dot{x}_3 = f' \\ y = x_1 \end{cases} \quad (4)$$

其连续状态空间描述为

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu + Ef' \\ y = Cx \end{cases} \quad (5)$$

式中: $A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}; B = \begin{pmatrix} 0 \\ b_0 \\ 0 \end{pmatrix}; E = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}; C = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}^T$ 。

将扰动 f' 扩展为系统的状态变量 $x_3 = f'$,则可得包含模型信息时式(3)系统的扩张状态方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 + b_0u \\ \dot{x}_3 = -164x_2 - 94x_3 - 94b_0u + f' \\ y = x_1 \end{cases} \quad (6)$$

其连续空间描述的各矩阵为: $A' = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -164 & -94 \end{pmatrix}$,

$$B' = \begin{pmatrix} 0 \\ b_0 \\ -94b_0 \end{pmatrix}, E' = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, C' = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}^T$$
。

通过比较 A, B, E, C 和 A', B', E', C' 可发现,主要区别在于状态矩阵 A' 和输入矩阵 B' 包含了更多被控对象的信息。

根据式(6)建立基于平台模型设计的 MLESO,表达式为

$$\begin{cases} e = z_1 - y \\ \dot{z}_1 = z_2 - l_{01}e \\ \dot{z}_2 = z_3 - l_{02}e + b_0u \\ \dot{z}_3 = -l_{03}e - 164z_2 - 94z_3 - 94b_0u \end{cases} \quad (7)$$

其中: $L = (l_1 \quad l_2 \quad l_3)$ 为估计误差增益; $Z = (z_1 \quad z_2 \quad z_3)$ 是对原系统状态 $X = (x_1 \quad x_2 \quad x_3)$ 的估计。

根据文献[7]中的方法,选取扩张状态观测器的

误差增益为

$$\begin{cases} l_1 = 3\omega_o \\ l_2 = 3\omega_o^2 \\ l_3 = \omega_o^3 \end{cases} \quad (8)$$

式中, ω_o 为观测器带宽,扩张状态观测器的调整仅需改变 ω_o 的值,其值越大,扩张观测器对各个状态的跟踪速度越快,跟踪误差越小,但高带宽会增加系统对噪声的敏感度,导致过多噪声进入系统。同时,实际中 ω_o 受系统硬件性能和采样步长的影响,不可能任意大,往往需要在跟踪精度和噪声抑制能力上做出妥协。

2.2 PD 控制器设计

经过 MLESO 对扰动的估计和补偿,采用 PD 控制器即可对系统进行很好的控制,控制器为

$$u = (u_0 - z_3)/b_0 \quad (9)$$

式中: $u_0 = k_p(v - z_1) - k_Dz_2$ 。

系统闭环传递函数为

$$G_{cl} = k_p / (s^2 + k_Ds + k_p) \quad (10)$$

选取 $k_p = \omega_c^2, k_D = 2\omega_c$,将系统改造成无零点的二阶系统,即

$$G_{cl} = \omega_c^2 / (s + \omega_c)^2 \quad (11)$$

式中, ω_c 为控制器的带宽,PD 控制器的调整仅需改变 ω_c 的值,它决定系统的响应速度,其值越大,系统响应越快。但是,带宽过高会引入传感器的高频噪声,而且还会引起机械谐振。

从上文设计过程中可看出,基于平台模型信息的线性自抗扰控制器与未采用模型信息的线性自抗扰控制器的不同之处在于扩张状态观测器的设计是否加入了被控对象的模型信息。MLADRC 控制器最终需要调整的参数仅为 ω_o, ω_c 和 b_0 ,参数整定方便,便于工程应用。

3 仿真与结果分析

在 Matlab/Simulink 中进行未采用模型信息的 LADRC 与采用模型信息的 MLADRC 仿真对比。在观测器带宽和控制器带宽、增益相同的条件下进行阶跃响应、角速度扰动抑制、力矩扰动抑制的对比,结果如图 4 所示。

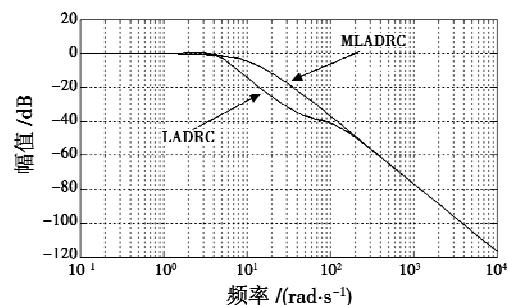


图 4 伯德图

Fig. 4 Bode plot

从图 4 可以看出,在观测器带宽 ω_o 、控制器带宽 ω_c 、增益 b_0 相同的条件下,加入模型信息后,闭环系统获得的带宽更大,也就意味着系统响应速度更快。

3.1 阶跃响应

加入幅值为 1 rad/s 的阶跃信号作为输入信号,从图 5 中可看出,采用 MLADRC 控制器,系统阶跃响应不仅没有超调,而且进入稳态的时间更短,显示了 MLADRC 较好的动态响应特性。

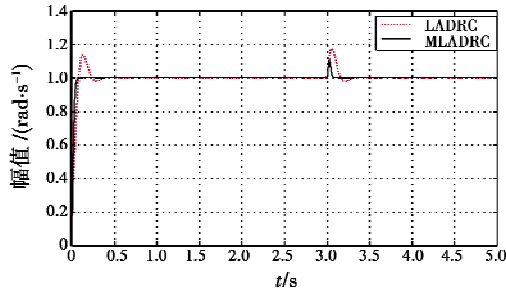


图 5 阶跃响应
Fig. 5 Step response

输入端第 3 s 加入幅值为 1 rad/s 的阶跃信号作为扰动信号。扰动对 MLADRC 控制下的系统造成影响较小,且 MLADRC 消除扰动的速度更快,体现了较强的鲁棒性。

3.2 扰动抑制能力分析

LADRC 和 MLADRC 的不同之处是观测器内部结构不同,其他各处结构均相同。图 6 为 LADRC/MLADRC 的控制器结构框图,以及平台扰动所加位置。

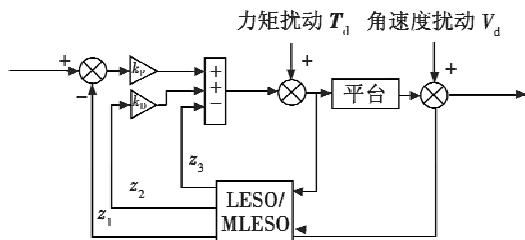


图 6 LADRC/MLADRC 控制框图
Fig. 6 Diagram of LADRC/MLADRC

分别加入平台力矩扰动 T_d 和平台载体角速度扰动 V_d ,参考信号为 0,进行 MLADRC 和 LADRC 的扰动抑制能力对比。所加扰动分别为:力矩扰动 T_d 是幅值为 1 N·m、频率为 1 Hz 的正弦信号;角速度扰动 V_d 是幅值为 3 (°)/s、频率为 1 Hz 的正弦信号。

图 7 和图 8 分别是在相同观测器带宽、控制器带宽和增益下,系统分别在 LADRC 和 MLADRC 控制下的力矩扰动残余和角速度扰动残余。

表 1 为在不同观测器带宽和不同控制器带宽下 LADRC 和 MLADRC 控制下系统扰动残余均方值。

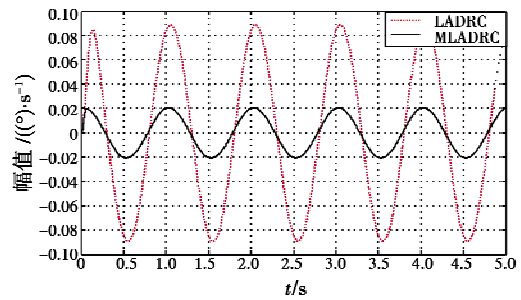


图 7 力矩扰动残余

Fig. 7 Residue of torque disturbance

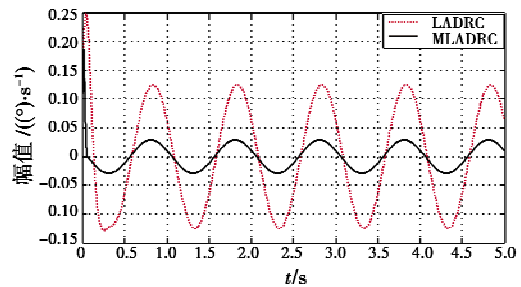


图 8 角速度扰动残余

Fig. 8 Residue of velocity disturbance

表 1 扰动残余均方值

Table 1 Disturbance residue (°)/s

		LADRC	MLADRC
$\omega_o = 60$	力矩扰动残余	0.1163	0.0189
$\omega_c = 100$	角速度扰动残余	0.1627	0.0026
$\omega_o = 90$	力矩扰动残余	0.05658	0.0130
$\omega_c = 100$	角速度扰动残余	0.0786	0.0176
$\omega_o = 90$	力矩扰动残余	0.03324	0.00778
$\omega_c = 150$	角速度扰动残余	0.0466	0.01089

从表 1 中可看出,采用模型信息的 MLADRC 具有更好的扰动抑制能力,随着观测器带宽和控制带宽的增加,扰动抑制能力逐渐增强。

4 结束语

仿真分析结果表明本文提出的利用平台模型信息进行光电稳定平台线性自抗扰控制器设计的方法可有效提高系统的响应速度和扰动抑制能力;基于模型信息设计的 MLADRC 需要整定的参数仅为 3 个。同时,该方法也可应用于其他能够获取对象模型信息的相关系统,具有一定的工程应用价值。

参考文献

[1] DU H L, SATISH S N. Modeling and compensation of low-velocity friction with bounds [J]. IEEE Transactions on Control Systems, 1999, 7(1): 110-121.
[2] AMIN J, FRIEDLAND B, HARNOY A. Implementation of a friction estimation and compensation technique [J]. IEEE

(下转第 119 页)