DOI: 10.3901/JME.2021.09.019

融合前馈与姿态预测的并联稳定平台自抗扰控制策略*

郑怀航^{1,2} 王军政^{1,2} 刘冬琛^{1,2} 汪首坤^{1,2}

(1. 北京理工大学复杂系统智能控制与决策国家重点实验室 北京 100081;

2. 北京理工大学伺服运动系统驱动与控制工信部重点实验室 北京 100081)

摘要: 针对并联式结构平台姿态稳定时对高频扰动信号跟踪的响应滞后以及负载、摩擦力等非线性因素等影响稳定精度问题,提出了一种融合前馈与姿态预测的并联稳定平台自抗扰控制(Active disturbance rejection control, ADRC)控制策略。通过对电动伺服缸、平台运动学建模,得到了电动伺服缸状态方程和平台稳定时电动缸位移与电动机电流控制量转化关系。基于 ADRC 扩张状态观测器对伺服电动缸在时变摩擦力和负载力等干扰下进行观测并补偿,并采用非线性跟踪微分器改善控制过程中电动机的超速报警与快速性之间的矛盾。最后将姿态预测方程与前馈控制相结合,提高了系统的响应速度,减小了稳定平台跟踪误差。在具有俯仰、横滚和垂直平移三个自由度的并联式稳定平台上进行仿真与试验,相比传统 PID 或 ADRC 控制方法,提出的控制策略不仅使稳定平台有很强的抗负载扰动能力,而且具有更快的响应速度和更高的稳定精度。

关键词: 稳定平台; 自抗扰控制; 前馈; 姿态预测

中图分类号: TG242

Active Disturbance Rejection Control Strategy of Parallel Stable Platform Based on Feedforward and Attitude Prediction

ZHENG Huaihang^{1,2} WANG Junzheng^{1,2} LIU Dongchen^{1,2} WANG Shoukun^{1,2}

(1. Key Laboratory of Complex System Intelligent Control and Decision,

Beijing Institute of Technology, Beijing 100081;

2. Key Laboratory of Servo Motion System Drive and Control, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

Abstract: This research proposes an active disturbance rejection control (ADRC) method with a feed-forward compensator for a parallel stability platform based on its attitude prediction model. The time delay of the control system responding to high frequency inputs and the nonlinear disturbances arising from loading conditions and frictions are considered to improve the tracking performance. Through analyzing the dynamics of the electric cylinders and the kinematics of the parallel mechanism, the control model in state space together with the kinematic inverse model of the system are introduced. An extended state observer (ESO) is designed to observe the nonlinear disturbances of friction behaviors and loading conditions, and the non-linear tracking differentiator (TD) is used to realize a rapidly response of the electric cylinders without overspeed alarm. With the observation results and the TD, a closed-loop controller with a feed-forward compensator based on the attitude prediction model of the platform is presented to improve tracking accuracy and response speed. The control method is verified on a 3 degree-of-freedom (DOF) parallel stability platform, and comparative experimental results indicate that under different loading conditions, the proposed controller can achieve satisfactory tracking performance for the 3-DOF platform with an increased response speed and a reduced tracking error.

Key words: stability platform; active disturbance rejection control; feedforward; attitude prediction

0 前言

并联式稳定平台以其承载能力强的特点成功应

用于航空摄影摄像以及车载、船载、机载的卫星接收天线等领域,其工作原理是通过伺服系统的运动控制来隔离平台所受到的外界环境扰动,从而保证平台的水平稳定^[1-3]。由于并联机构存在强耦合并且稳定平台的负载力大小与负载的类型及运动状态密切相关,使得该类伺服系统存在较强的非线性^[4],

* 国家自然科学基金资助项目(51675041)。20200526 收到初稿,20200815 收到修改稿

另外大负载工况下的系统不仅响应存在严重滞后^[5], 计算机和姿态传感器的采样延迟也会导致控制滞后问题^[6], 因此针对并联式稳定平台设计一种高精度、高频响、鲁棒性强的伺服运动控制算法来解决系统中的非线性与滞后问题, 成为推动稳定平台发展的关键研究内容^[7-8]。

国内外学者对于并联式稳定平台设计了许多有效的控制算法, 如 PID 控制算法^[9]、模糊滑膜控制算法^[10]、鲁棒控制算法^[11]以及自适应控制算法^[12]等。其中, PID 控制算法出现最早, 且由于具有不依赖系统模型、易工程实现的特点得到广泛的应用^[13]。然而, 随着伺服控制系统复杂度的提升和所需控制指标的不断提高, 传统 PID 算法逐渐难以满足要求。传统 PID 算法对于“给定信号”与“反馈信号”的处理过于简单, 实际系统中存在着大量的非线性和不确定性使得该算法难以获得理想的控制效果。针对这些问题, 研究人员致力于对传统 PID 控制算法进行改进与优化^[14-16], 其中韩京清研究员在 1998 年正式提出了自抗扰控制算法 (Active disturbance rejection control ADRC), 该算法由跟踪微分器、非线性状态误差控制律以及扩张状态观测器组成^[17]。在自抗扰控制算法体系中, 作用于被控对象的所有不确定因素都被归结于未知扰动。利用扩张状态观测器通过对象的输入输出对扰动进行估计与补偿; 利用跟踪微分器合理安排过渡过程; 利用非线性状态误差控制律综合出控制对象的最终输入。该方法对含有扰动的非线性系统具备良好的控制能力, 得到了广泛的实际应用并取得了有效的成果^[18-19]。针对并联式稳定平台设计自抗扰控制算法, 理论上可以解决其非线性问题, 有助于在大负载工况下进一步提高平台的稳定精度。文献[20]将模糊 ADRC 用于 Stewart 平台抗干扰高精度运动控制中, 其试验结果表明, 对于该文中的 Stewart 平台模糊 ADRC 可以获得更高的控制精度, 但该文没有进一步考虑高频扰动下数字系统采样延迟等问题。

本文以三自由度并联式平台为研究对象, 旨在实现大负载工况下的稳定平台高精度控制。该平台具体结构如图 1 所示, 为了进一步提高平台的负载能力, 额外设计气平衡机构用以平衡大部分负载重力。但与此同时气缸的伸缩过程引入了额外气压力扰动, 且过大的负载加重了整体系统的响应滞后。由此, 本文提出了一种融合前馈与姿态预测的并联稳定平台自抗扰 (ADRC) 控制策略, 采用非线性扩张状态观测器对气压变化产生

的扰动力以及伺服电动缸时变的摩擦力和负载力进行观测并补偿, 利用非线性跟踪微分器改善了微分信号品质。通过设计前馈环节与差分预测方程, 对电动缸速度进行前馈补偿并改善了数字系统采样滞后对控制带来的影响, 提高了系统的响应速度, 减小了跟踪误差。试验与仿真结果表明, 融合前馈与姿态预测的并联稳定平台自抗扰控制策略对负载扰动表现出很好的鲁棒性, 并具有较高的稳定精度。

1 并联式三自由度稳定平台数学模型

三自由度并联式稳定平台由三个一体化电动缸和一个气缸并联支撑, 具有横滚、俯仰、垂直升降三个方向的自由度。通过姿态传感器感知载体运动状态, 利用数字控制器和解耦控制算法实现平台的水平稳定, 如图 1 所示。

图 1 三自由度并联式稳定平台实物图

1.1 电动伺服缸动力学模型

电动伺服缸是将伺服电动机与丝杠一体化设计的模块化产品, 将伺服电动机的旋转运动转换成直线运动, 同时将伺服电动机的精确转速、转数、扭矩控制转变成精确速度、位置、推力控制。

伺服电动机是一种多输入多输出、高阶、强耦合的非线性复杂系统, 需要电磁解耦的方法分别控制产生转矩和产生磁通的电流从而获得理想的动态特性。根据以上需求出现了矢量控制技术^[21], 以伺服电动机中的交流异步伺服电动机为例: 电

动机在两相同步旋转坐标系中(M-T)数学模型描述如下。

转矩方程

$$T_e = n_p L_M (i_{Ts} i_{Mr} - i_{Ms} i_{Tr}) = n_p \frac{L_{ss}}{L_{rr}} i_{Ts} \psi_2 \quad (1)$$

运动方程

$$T_e = T_L + D\omega + J_m \frac{d\omega}{dt} + K\theta \quad (2)$$

式中, T_e 为电磁转矩; T_L 为负载转矩; J_m 为电动机转动惯量; D 为阻力矩系数; K 为扭转弹性转矩系数; n_p 为极对数; L_M 为定子绕组与转子绕组之间的互感; L_{ss} 为定子绕组的自感; L_{rr} 为转子绕组的自感; i_{Ts} 为定子 T 轴的电流; i_{Tr} 为转子在 T 轴的电流; i_{Ms} 为定子 M 轴的电流; i_{Mr} 为转子在 M 轴的电流; ψ_2 为转子总磁链; ω 为转子角速度; θ 为转子转过的机械角度。

磁链有如下关系

$$\psi_2 = \frac{L_M}{\tau_2 s + 1} i_{Ms} \quad (3)$$

可以看出转子总磁链 ψ_2 完全由定子电流励磁分量 i_{Ms} 决定, 二者之间的变化关系为一阶惯性环节, 只要使定子电流励磁分量 i_{Ms} 不变, 则转子总磁链 ψ_2 不变。从式(1)中可以看出, 电磁转矩与定子电流分量 i_{Ts} 成正比。因此在使得转子总磁链恒定的前提下, 可以通过控制 i_{Ts} 来成比例地控制 T_e 。

为了方便计算机的控制实现, 利用二相旋转坐标系上的转子磁链观测模型。主要步骤描述为

$$\psi_2 = \frac{L_M}{\tau_2 s + 1} i_{Ms} \quad (4)$$

$$\omega_s = \frac{L_M}{\tau_2 \psi_2} i_{Ts} \quad (5)$$

$$\omega_0 = \omega + \omega_s \quad (6)$$

式中, ω_0 为同步角速度; ω_s 为转差角速度。具体控制框图如图 2 所示。

图 2 磁场定向计算机控制框图

由式(1)、(2)可以得出

$$\begin{cases} \dot{\theta} = \omega \\ \dot{\omega} = \frac{n_p L_{ss} \Psi_2}{J_m L_{rr}} i_{Ts} - \frac{1}{J_m} T_L - \frac{D}{J_m} \omega - \frac{K}{J_m} \theta \end{cases} \quad (7)$$

由于伺服电动缸的导程为 P , 将式(7)两边同时乘以 P , 并将 T_L 认为是时变函数 $T_L(t)$, 得到下式

$$\begin{cases} \dot{l} = v \\ \dot{v} = \frac{n_p L_{ss} \Psi_2 P}{J_m L_{rr}} i_{Ts} - \frac{P}{J_m} T_L(t) - \frac{D}{J_m} v - \frac{K}{J_m} l \end{cases} \quad (8)$$

式中, l 为电动缸的伸出长度; v 为电动缸的伸缩速度。

1.2 并联式三自由度稳定平台运动学模型

三自由度并联式稳定平台具有横滚、俯仰、垂直升降三个自由度。

图 3 并联式三自由度稳定平台运动学模型

如图 3 所示, 将平台解算过程中涉及的坐标系命名如下。

(1) 扰动面坐标系(S_j)。

该坐标系与三自由度并联式稳定平台的底部安装座一起运动, 原点 O_j 位于三自由度并联式稳定平台底部安装座的中心。

(2) 稳定面坐标系(S_p)。

该坐标系与三自由度并联式稳定平台的稳定面一起运动, 原点 O_p 位于稳定面的中心。

将稳定面三个电动缸的连接铰点分别命名为 A_1 、 A_2 、 A_3 , 将底部安装座上三个电动缸的连接铰点分别命名为 B_1 、 B_2 、 B_3 。设两个全等的等边三角形外接圆半径为 R_1 。则稳定面三个电动缸的铰点 A_1 、 A_2 、 A_3 在稳定面坐标系中的坐标表示为

$$A^p = [A_1^p \ A_2^p \ A_3^p] \quad (9)$$

底部安装座上三个电动缸的铰点 B_1 、 B_2 、 B_3 在

扰动面坐标系中的坐标表示为

$$\mathbf{B}^j = [\mathbf{B}_1^j \quad \mathbf{B}_2^j \quad \mathbf{B}_3^j] \quad (10)$$

其中具体数量关系表示如下($\theta = 60^\circ$)

$$\begin{cases} \mathbf{A}_1^p = [-R_1 \quad 0 \quad 0]^T \\ \mathbf{A}_2^p = [R_1 \cos \theta \quad -R_1 \sin \theta \quad 0]^T \\ \mathbf{A}_3^p = [R_1 \cos \theta \quad R_1 \sin \theta \quad 0]^T \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \mathbf{B}_1^j = [-R_1 \quad 0 \quad 0]^T \\ \mathbf{B}_2^j = [R_1 \cos \theta \quad -R_1 \sin \theta \quad 0]^T \\ \mathbf{B}_3^j = [R_1 \cos \theta \quad R_1 \sin \theta \quad 0]^T \end{cases} \quad (12)$$

定义稳定面坐标系到扰动面坐标系的齐次变换矩阵为 $\mathbf{T}_p^j$, 旋转矩阵为 $\mathbf{R}_p^j$, O_p 到 O_j 的长度为 Z_c , 旋转顺序为先横滚 α 角再俯仰 β 角(即 X - Y 顺序)。则顶点 A_1, A_2, A_3 在扰动面坐标系中的坐标表示

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}_i^j \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{T}_p^j \begin{bmatrix} \mathbf{A}_i^p \\ 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\mathbf{T}_p^j = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_p^j & \mathbf{P}_p^j \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\mathbf{R}_p^j = \begin{bmatrix} \cos \beta & \sin \beta \sin \alpha & \sin \beta \cos \alpha \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ -\sin \beta & \cos \beta \sin \alpha & \cos \beta \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\mathbf{P}_p^j = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ Z_c \end{bmatrix} \quad (16)$$

每条电动缸的位置给定量 $|\mathbf{l}_i|$ 便可通过空间向量求模的方法获得

$$\mathbf{l}_i = \mathbf{A}_i^j - \mathbf{B}_i^j = \begin{bmatrix} l_{ix} \\ l_{iy} \\ l_{iz} \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$|\mathbf{l}_i| = \sqrt{(l_{ix})^2 + (l_{iy})^2 + (l_{iz})^2} \quad (18)$$

2 自抗扰控制器设计

根据自抗扰原理, 确定了由自抗扰控制器构成的三自由度并联式稳定平台控制方案, 整体系统组成如图 4 所示, 自抗扰控制器由跟踪微分器、扩张状态观测器、非线性状态误差控制率三部分组成。利用跟踪微分器合理安排电动缸控制量过渡过程, 初步解决了系统快速性与超调之间的矛盾。由扩张状态观测器观测系统的状态变量和未知扰动。由非线性状态误差控制率将控制对象转化为简单的积分串联型系统。

图 4 融合前馈与姿态预测的 ADRC 控制框图

由式(8), 非线性跟踪微分器安排过渡过程的离散状态方程可表示为

$$\begin{cases} l_i(k+1) = l_i(k) + T_0 v_i(k) \\ v_i(k+1) = v_i(k) + T_0 f_{st}(l_i(k) - l_i^*(k), v_i(k), r, h) \end{cases} \quad (19)$$

式中, $l_i^*(k)$ 为非线性跟踪微分器的输入信号。 $l_i(k)$ 跟踪输入信号 $l_i^*(k)$, 而 $v_i(k)$ 是 $l_i(k)$ 的微分, T_0 为离散控制周期。 r 为速度因子, 确定非线性跟踪微分器的跟踪速度, h 为滤波因子, 确定非线性跟踪

微分器的滤波效果。

离散快速控制最优综合函数为

$$fst(l_i(k) - l^*(k), v_i(k), r, h) = - \begin{cases} \frac{r}{d} a & |a| \leq d \\ r \operatorname{sgn}(a) & |a| > d \end{cases} \quad (20)$$

$$a = \begin{cases} v_i(k) + \frac{a_0 - d}{2} \operatorname{sgn}[y(k)] & |y(k)| > d_0 \\ v_i(k) + \frac{y(k)}{h} & |y(k)| \leq d_0 \end{cases} \quad (21)$$

$$y(k) = l_i(k) - l^*(k) + h v_i(k) \quad (22)$$

$$d = rh \quad (23)$$

$$d_0 = dh \quad (24)$$

$$a_0 = \sqrt{d^2 + 8r|y(k)|} \quad (25)$$

将式(8)中的 $-\frac{p}{J_m} T_L(t)$ 视为扰动项 $w(t)$,

$-\frac{D}{J_m} v(k) - \frac{K}{J_m} l(k)$ 视为已知建模项 $f_0(z_1, z_2)$, 构造

三阶状态观测器 ESO 为

$$\begin{cases} e(k) = l_b(k) - l(k) \\ l_b(k+1) = l_b(k) + T_0(v_b(k) - \beta_{01}e(k)) \\ v_b(k+1) = v_b(k) + T_0(z_3(k) - \beta_{02}fal(e(k), \alpha_1, \delta_1) + \\ f_0(l_b(k), v_b(k)) + bu(k)) \\ z_3(k+1) = z_3(k) - T_0\beta_{03}fal(e(k), \alpha_2, \delta_1) \end{cases} \quad (26)$$

式中, $l_b(k)$ 是对电动缸实际位移 $l(k)$ 的估计值; $v_b(k)$ 是 $l_b(k)$ 的微分; $z_3(k)$ 是对系统总扰动的估计, $u(k)$ 是系统的输入。

最后对非线性状态误差控制率进行设计

$$\begin{cases} e_1 = l_i(k) - l_b(k) \\ e_2 = v_i(k) - v_b(k) \\ u_0(k) = \beta'_{01}fal(e_1, \alpha'_1, \delta'_1) + \beta'_{02}fal(e_2, \alpha'_2, \delta'_1) \\ u(k) = u_0(k) - \frac{(z_3(k) + f_0(l_b(k), v_b(k)))}{b} \end{cases} \quad (27)$$

$$fal(e, \alpha, \delta) = \begin{cases} |e|^\alpha \operatorname{sgn}(e) & |e| > \delta \\ \frac{e}{\delta^{1-\alpha}} & |e| \leq \delta \end{cases} \quad \delta > 0 \quad (28)$$

3 前馈控制器设计

在实际工程控制中前馈控制对提高系统响应速度有着不可替代的作用, 许多伺服系统均通过引入前馈控制来改善系统动态性能^[22]。为了提高三自由度并联式稳定平台在大负载工况下的跟踪精度, 本

文对平台进行了前馈控制设计, 根据姿态传感器采集到的扰动平台角度与角速度信息作为前馈信号通过对各缸长度进行求导, 将扰动平台角度与角速度折算成各电动缸上的扰动线速度, 即将式(18)对时间 t 进行求导

$$\frac{d|l_i|}{dt} = \frac{(A_{ix}^j - B_{ix}^j) \frac{dA_{ix}^j}{dt} + (A_{iy}^j - B_{iy}^j) \frac{dA_{iy}^j}{dt} + (A_{iz}^j - B_{iz}^j) \frac{dA_{iz}^j}{dt}}{\sqrt{(A_{ix}^j - B_{ix}^j)^2 + (A_{iy}^j - B_{iy}^j)^2 + (A_{iz}^j - B_{iz}^j)^2}} \quad (29)$$

再将式(11)~(16)代入式(29)中可得到各电动缸速度与平台角度及角速度的折算关系。在姿态传感器检测到扰动角度及角速度时系统及时产生等大反向的调整量, 使得平台趋于稳定。由此在位置偏差出现之前, 速度信号可提前消除部分扰动倾角, 增快系统的响应速度, 使系统在大角度高频率扰动的工况下具有更加优异的性能指标。

4 姿态预测控制器设计

由于扰动源的具体运动方式未知、实际工程中运用的计算机采样频率有限、姿态传感器采集信号并传输至计算机的过程中含有时间延迟, 因此除了系统的对信号的响应滞后之外, 计算机所接收到的姿态角信息与实际情况相比也含有时间滞后。

前文所述的前馈控制器为开环控制, 旨在根据底座角速度的变化值直接补偿扰动作用对被控变量的影响。但前馈控制器无法感受到其他扰动对被控变量的影响, 因此在实际控制过程中, 为了达到工艺要求, 就必须将前馈控制与反馈控制结合起来。前馈控制通道的计算较为简便, 往往可通过简单的模拟电路或低时延的数字控制器实现。而注重系统鲁棒性的反馈控制则需要通过高运算力处理器的复杂运算得出最终控制量。若高运算力处理器采集信号与计算的过程具有较大延迟, 导致反馈控制量更新滞后, 极端情况下甚至可能出现反馈控制量与前馈控制量相互抵抗的现象。因此, 为了解决上述问题, 并且方便整体算法后期能模块化地移植至各类数字系统上, 姿态预测控制器作为单独模块进行设计。

本文为了确保在高频扰动下三自由度并联式稳定平台的实时解算要求, 需要扰动源的姿态进行预测。假设系统的控制周期为 Δt , 姿态传感器采集扰动源的扰动角度为 $\alpha(t)$ 、 $\beta(t)$ 。则在当前 t 时刻,

系统可以得到的扰动源姿态信息包括 $\alpha(t)$ 、 $\alpha(t-\Delta t)$ 、 $\alpha(t-2\Delta t)$ 、 $\beta(t)$ 、 $\beta(t-\Delta t)$ 、 $\beta(t-2\Delta t)$ 。

由角度差分进行轨迹预测获得当前时刻的角速度估计值

$$\omega_{\alpha}(t) = \frac{1.5\alpha(t) + 0.5\alpha(t-2\Delta t) - 2\alpha(t-\Delta t)}{\Delta t} \quad (30)$$

$$\omega_{\beta}(t) = \frac{1.5\beta(t) + 0.5\beta(t-2\Delta t) - 2\beta(t-\Delta t)}{\Delta t} \quad (31)$$

那么当前的角加速度可估计为

$$q_{\alpha}(t) = \frac{\omega_{\alpha}(t) - \omega_{\alpha}(t-\Delta t)}{\Delta t} \quad (32)$$

$$q_{\beta}(t) = \frac{\omega_{\beta}(t) - \omega_{\beta}(t-\Delta t)}{\Delta t} \quad (33)$$

根据扰动源当前时刻的角度、角速度、角加速度可以获得扰动源下一时刻的角度预测量

$$\alpha(t+\Delta t) = \alpha(t) + \omega_{\alpha}(t)\Delta t + 0.5q_{\alpha}(t)\Delta t^2 \quad (34)$$

$$\beta(t+\Delta t) = \beta(t) + \omega_{\beta}(t)\Delta t + 0.5q_{\beta}(t)\Delta t^2 \quad (35)$$

最终把扰动源下一时刻的角度预测量作为当前时刻的控制量，补偿了部分系统采样和传感器采样带来的延迟问题。具体控制框图如图 4 所示。

5 仿真与试验

通过仿真与试验分别验证自抗扰控制器对于伺服电动缸的控制性能，以及融合前馈与姿态预测的自抗扰控制策略在三自由度并联式稳定平台所展现的控制效果。利用 Matlab/Simulink 搭建仿真模型，借助 Simulink/S-函数搭建控制系统的数学模型。

仿真和试验使用的电动机参数一致，伺服电动机额定输出功率 400 W，额定扭矩 1.27 N·m，额定转速 3 000 r/min，电动机转子惯量 0.3 kg·m²，转矩系数 0.712，额定相电流 2.5 A，电枢绕组相电阻 5.58 Ω，电枢绕组相电感 17.33 mH，机械时间常数 1.08 ms，电气时间常数 3.11 ms。自抗扰控制器参数选取为： $r=20$ ， $h=0.01$ ， $b=15$ ， $\beta'_{01}=59.8$ ， $\beta'_{02}=5.9$ ， $\beta_{01}=212$ ， $\beta_{02}=350$ ， $\beta_{03}=2\ 800$ 。

对于本文设计的控制策略进行系统仿真，在 $t=1$ s 时刻对系统施加幅值为 150 mm 的阶跃信号，在 $t=3.14$ s 时刻开始对系统施加周期性系统扰动信号。系统的响应曲线如图 5 所示，在系统扰动下控制器输出的控制量变化曲线如图 6 所示。

图 5 系统阶跃响应曲线及抗扰性能测试

图 6 系统扰动下电动缸的控制量变化曲线

在 Matlab 中模拟系统的采样时间延迟与控制滞后，对比使用自抗扰算法与加入融合前馈与姿态预测的自抗扰算法时电动缸的跟踪曲线(电动缸给定曲线是由给定姿态角通过运动学模型解算得到)，如图 7、8 所示。

图 7 ADRC 下电动缸跟踪曲线

图 8 融合前馈与姿态预测的 ADRC 下电动缸跟踪曲线

可以看出，融合前馈与姿态预测的并联稳定平台自抗扰控制策略在具有采样时延与控制滞后的系

统中表现出更快的响应速度和更高的跟踪精度。

在仿真分析基础上搭建实际系统并进行试验测试, 试验平台使用的电动机参数与仿真时使用的参数相同。负载扰动测试如图 9 所示, 在 710~715 s 之间加入突变负载扰动, 可看出系统具有较好的抗扰动性能。加入前馈与姿态预测前后的单缸自抗扰控制曲线如图 10、11 所示, 未加入前馈与姿态预测的单缸自抗扰控制虽也能达到一定的跟踪效果, 但给定曲线与跟踪曲线之间仍存在时延现象, 图 11 在加入前馈与姿态预测后相较于图 10 进一步提高了电动缸的跟踪精度。加入前馈与姿态预测前后的平台稳定曲线(扰动平台角度/稳定平台角度)如图 12、13 所示, 可看出加入前馈与姿态预测之后, 平台整体稳定效果有显著提升。

图 9 负载扰动测试

图 10 未加入前馈与姿态预测的单缸自抗扰控制曲线

图 11 加入前馈与姿态预测的单缸自抗扰控制曲线

图 12 未加入前馈与姿态预测的平台稳定曲线

图 13 加入前馈与姿态预测的平台稳定曲线

实际装置运行过程如图 14 所示。

图 14 系统工作在大负载工况下的稳定展示

6 结论

(1) 对三自由度并联式稳定平台的伺服电动缸进行动力学建模, 获得伺服电动缸位置控制量与电流控制量的转化关系, 同时剖析系统运动过程中受到的负载力情况。通过分析平台整体的运动学模型实现并联式平台运动角度到各电动缸伸长量的解耦。

(2) 自抗扰控制器初步缓解了系统快速性与超调的矛盾, 通过估计补偿系统的“总扰动”将含有非线性、强耦合、大负载扰动的控制对象近似转化为简单的积分串联型系统。

(3) 设计前馈控制器, 在位置偏差信号出现之前利用速度控制信号先行作用于系统, 进一步增加系统的响应速度, 减小平台的跟踪误差, 使系统能在大角度、高频率的晃动下保持稳定面的水平稳定。

(4) 姿态预测控制器能补偿传感器信号采集和数字控制器信息处理所产生的延时问题。仿真结果与试验结果均表明从扰动补偿、控制延时补偿和采样延时补偿三方面设计稳定平台控制系统与单纯的 PID 控制相比具有更好的鲁棒性、更快的响应速度和更高的稳定精度。其中, 在 120 kg 载荷、0.5 Hz、 $\pm 10^\circ$ 的底座扰动工况下, 本文控制策略的扰动衰减量为 95%, 传统 PID 的扰动衰减量为 75%。在空载工况下, 传统 PID 的算法与本文控制策略的扰动衰减量相对差距会有所减小。

综上所述, 本文的研究成果与结论在稳定平台的整体设计与性能指标提升方面蕴含极佳的参考价值。

参 考 文 献

- [1] 郭菲, 李永泉, 李玉昆, 等. 电液驱动 3-UPS/S 并联稳定平台的动力学参数辨识[J]. 中国机械工程, 2016, 27(21): 2862-2868.
GUO Fei, LI Yongquan, LI Yukun, et al. Identification of dynamic parameters of electrohydraulic driven 3-UPS/S parallel stable platform[J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(21): 2862-2868.
- [2] 王力航, 郭菲, 卢文娟, 等. 3UPS / S 舰船稳定平台非惯性系动力学建模[J]. 机械工程学报, 2020, 56(1): 20-29.
WANG Lihang, GUO Fei, LU Wenjuan, et al. Dynamic modeling of 3UPS / S ship stable platform in non inertial system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(1): 20-29.
- [3] ZHANG Lijie, GUO Fei, LI Yongquan, et al. Global dynamic modeling of electro-hydraulic 3-UPS/S parallel stabilized platform by bond graph[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2016, 29(6): 1-10.
- [4] 刘冬琛, 王军政, 汪首坤, 等. 一种基于并联 6 自由度结构的电动轮足机器人[J]. 机器人, 2019, 41(1): 67-76, 84.
LIU Dongchen, WANG Junzheng, WANG Shoukun, et al. An electric wheel foot robot based on parallel 6-DOF structure [J]. Robot, 2019, 41(1): 67-76, 84.
- [5] 刘洋, 杨荃, 周春, 等. 基于预测函数算法的冷连轧边降滞后控制研究[J]. 机械工程学报, 2015, 51(18): 64-70.
LIU Yang, YANG Quan, ZHOU Chun, et al. Research on edge drop lag control of tandem cold rolling based on predictive function algorithm[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51 (18): 64-70.
- [6] 李卫, 孙增圻. 包含延时的采样系统的最优控制[J]. 控制理论与应用, 1987, 4(2): 12-20.
LI Wei, SUN Zengqi. Optimal control of sampling system with time delay[J]. Control Theory and Application, 1987, 4(2): 12-20.
- [7] PRIETO P J, CAZAREZ-CASTRO N R, AGUILAR L T, et al. Fuzzy slope adaptation for the sliding mode control of a pneumatic parallel platform[J]. International Journal of Fuzzy Systems, 2017, 19(1): 167-178.
- [8] MOHAMMED A M, LI Shuai. Dynamic neural networks for kinematic redundancy resolution of parallel Stewart platforms[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2015, 46(7): 1538-1550.
- [9] 李军法, 宋敏. 基于 Stewart 平台并联机床伺服控制系统稳定性研究[J]. 液压气动与密封, 2018, 38(8): 35-38, 42.
LI Junfa, SONG Min. Research on stability of servo control system for parallel machine tool based on Stewart platform[J]. Hydraulic Pneumatic and Sealing, 2018, 38(8): 35-38, 42.
- [10] 徐东光, 吴博, 吴盛霖, 等. 基于模糊调节的 Stewart 平台积分滑模变结构控制器的设计[J]. 中国机械工程, 2008, 19(4): 27-30.
XU Dongguang, WU Bo, WU Shenglin, et al. Design of integral sliding mode variable structure controller for Stewart platform based on fuzzy regulation[J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19 (4): 27-30.
- [11] IQBAL S, BHATTI A I. Load varying polytopic based robust controller design in LMI framework for a 2DOF stabilized platform[J]. Arabian Journal for Science & Engineering, 2011, 36(2): 311-327.
- [12] ZHAO Dongya, LI Shaoyuan, GAO Feng. Fully adaptive feedforward feedback synchronized tracking control for Stewart platform systems[J]. International Journal of Control Automation and Systems, 2008, 6(5): 689-701.
- [13] HAN Jingqing. Nonlinear PID controller[J]. ACTA Automatic Sinica, 1994, 20(4): 487-490.
- [14] KHALID A, ZEB K, HAIDER A. Conventional PID, adaptive PID, and sliding mode controllers design for aircraft pitch control[C]// 2019 International Conference on Engineering and Emerging Technologies (ICEET). IEEE, 2019: 1-6.
- [15] 邹俊, 傅新, 杨华勇, 等. 免疫 PID 在液压位置伺服系统中的应用研究[J]. 机械工程学报, 2005, 41(1): 1-5.

- ZOU Jun, FU Xin, YANG Huayong, et al. Application of immune PID in hydraulic position servo system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(1): 1-5.
- [16] HAN Jianda, ZHU Zhiqiang, JIANG Ziya, et al. Simple PID parameter tuning method based on outputs of the closed loop system[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2016, 29(3): 465-474.
- [17] HAN Jingqing. Active disturbances rejection controller and its applications[J]. Control and Decision, 1998, 13(1): 19-23.
- [18] 李杰, 齐晓慧, 万慧, 等. 自抗扰控制: 研究成果总结与展望[J]. 控制理论与应用, 2017, 34(3): 281-295.
- LI Jie, QI Xiaohui, WAN Hui, et al. ADRC: Summary and prospect of research results[J]. Control Theory and Application, 2017, 34(3): 281-295.
- [19] 刘善慧, 梅雪松, 李健, 等. 多色套准系统前馈自抗扰控制器设计[J]. 机械工程学报, 2015, 51(5): 143-150.
- LIU Shanhui, MEI Xuesong, LI Jian, et al. Design feedforward active disturbance rejection control controller for multi-color register system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(5): 143-150.
- [20] 翟天嵩, 段宝岩, 仇原鹰, 等. 基于模糊 ADRC 的嵌入式控制技术在 Stewart 平台控制系统中的应用[J]. 电子机械工程, 2004, 20(6): 57-61.
- ZHAI Tiansong, DUAN Baoyan, QIU Yuanying, et al. Application of embedded control technology based on fuzzy ADRC in Stewart platform control system[J]. Electro-mechanical Engineering, 2004, 20(6): 57-61.
- [21] 杨淑英, 丁大尉, 李曦, 等. 基于新型转子磁链观测器的异步电机转矩闭环矢量控制[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(11): 3298-3306.
- YANG Shuying, DING Dawei, LI Xi, et al. Torque closed loop vector control of asynchronous motor based on new rotor flux observer[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2017, 37(11): 3298-3306.
- [22] HABINEZA D, RAKOTONDRABE M, LE GORREC Y. Bouc-Wen modeling and feedforward control of multivariable hysteresis in piezoelectric systems: Application to a 3-DoF piezotube scanner[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2015, 23(5): 1797-1806.
-
- 作者简介: 郑怀航, 男, 1997 年出生, 博士研究生。主要研究方向为机器人伺服运动驱动与控制。
E-mail: ss8zzhhang@163.com
- 王军政(通信作者), 男, 1964 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为伺服运动驱动与控制、机器人控制和负载模拟与静态试验。
E-mail: wangjz@bit.edu.cn