

船载稳定平台的鲁棒自适应神经网络控制

贺广健, 彭程

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:针对船载稳定平台的平稳控制问题, 考虑到稳定平台存在未建模动态等不确定性以及未知时变环境扰动, 将自适应技术、径向基神经网络技术与矢量逆推的方法相结合, 提出一种鲁棒自适应神经网络的稳定平台控制方案。采用矢量逆推的方法, 设计稳定平台的平稳控制律; 运用径向基神经网络技术对稳定平台系统的未建模动态等不确定性进行估计及补偿; 利用自适应技术在线估计径向基神经网络相关参数及环境扰动的上界; 并引入最少学习参数方法降低控制方案的计算负载。通过 Lyapunov 理论证明稳定平台闭环控制系统的所有变量的一致最终有界性。最后, 基于稳定平台的仿真结果验证了所提出的鲁棒自适应神经网络控制方案的有效性。

关键词: 稳定平台; 自适应技术; 径向基神经网络; 矢量逆推; 最少学习参数

中图分类号: U661.33 文献标识码: A

文章编号: 1009-3044(2021)19-0009-05

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



DOI:10.14004/j.cnki.ckt.2021.1847

Robust Adaptive Neural Network Control of Ship-borne Stabilization Platform

HE Guang-jian, PENG Cheng

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: Aiming at the problem of stable control of the ship-borne stabilization platforms, considering the uncertainties such as unmodeled dynamics and unknown time-varying environmental disturbances of the ship-borne stabilization platforms. The adaptive technology, radial basis neural network technology and backstepping method are combined to propose a robust adaptive neural network stable platform control scheme. The method of backstepping is used to design the stable control law of the stable platform; the RBF neural network technology is used to estimate and compensate the uncertainties such as unmodeled dynamics of the stable platform system. The adaptive technology is used to estimate the relevant parameters of the RBF neural network and the upper bounds of environmental disturbances; and the least learning parameter method is introduced to reduce the calculation load of the control scheme. The Lyapunov theory is used to prove that all variables of the closed-loop control system of the stable platform are uniformly ultimately bounded. Finally, the simulation results based on the stable platform verify the effectiveness of the proposed robust adaptive neural network control scheme.

Key words: stable platform; adaptive technology; radial basis neural network; backstepping; least learning parameter

1 引言

作业中的船舶受到风、浪、流等海洋环境影响会产生横摇、纵摇、艏摇、横荡、纵荡和升沉六个自由度的运动, 船舶摇荡运动严重影响船载直升机的安全起降、船载吊车等设备的安全作业等。船舶横荡、纵荡和艏摇运动会通过船舶动力定位系统被抑制, 所以为了补偿船舶横摇、纵摇和升沉运动, 本文提出将稳定平台作为船舶的减摇装置, 隔离船舶横摇、纵摇和升沉运动对船舶设备等的影

响。船载稳定平台控制精度是船载稳定平台的关键性能指标,

有效的控制方案可以提高稳定平台控制精度。船载稳定平台系统是一个严重非线性的、存在着未知时变环境扰动以及未建模动态等不确定性的系统。文献[1]针对舰载雷达稳定平台, 采用带有修正因子的模糊控制算法设计控制器, 具有良好的鲁棒性与控制效果; 文献[2]针对陀螺稳定平台, 采用灰色滑膜算法设计控制器, 有效减小了系统非线性摩擦对控制效果的影响; 文献[3-4]针对陀螺稳定平台, 采用自抗扰控制技术设计控制器, 有效地提高系统的抗干扰性和鲁棒性; 然而, 文献[1-4]的被控系统的主要结构为三轴陀螺式, 但三轴陀螺式稳定平台结构的限制, 其承载能力较低。近年来, 随着海洋工程快速发展对

收稿日期: 2021-02-12

基金项目: 吉林省科技发展计划项目(20200201294JC)

作者简介: 贺广健(1993—), 男, 吉林舒兰县人, 研究实习员, 硕士, 主要研究方向精密控制、嵌入式系统; 彭程(1987—), 女, 吉林长春人, 助理研究员, 博士, 主要研究方向为运动跟踪与伺服控制。

大型船载设备稳定的需求,大型船载稳定平台应运而生。针对大型船载稳定平台的稳定控制,文献[5-7]分别采用分离式PID、专家PID、非线性PID设计控制器,文献[8-10]将模糊与PID相结合形成模糊自适应PID控制方案设计控制器,虽然上述算法具有PID不依赖于模型等优点,但是对于外界时变环境扰动的抗干扰性仍比较差。文献[11]针对并联稳定平台系统,采用滑膜变结构方法设计了控制器,引入了边界层减小抖振问题,使得系统最终具有较强的鲁棒性,但系统仍存在抖振;文献[12]针对船载稳定平台系统,采用非线性模型预测控制原理设计了控制器,但模型预测需部分模型先验知识。

本文考虑到稳定平台未建模动态等不确定性以及未知时变环境,提出一种鲁棒自适应神经网络控制方案,利用稳定平台补偿船舶的升沉、横摇和纵摇三个自由度运动;此外,设计自适应律提高控制方案的鲁棒性及采用最少学习参数技术减小控制器计算负担,通过Lyapunov稳定性理论证明所设计的控制律能够保证闭环控制系统的稳定性。

2 问题描述及先验知识

船载稳定平台运动参考系如图1所示,其中坐标系 $\{P\}-O_p X_p Y_p Z_p$ 为附体坐标系、坐标系 $\{G\}-O_g X_g Y_g Z_g$ 为北东坐标系。附体坐标系 $\{P\}-O_p X_p Y_p Z_p$ 的坐标原点 O_p 位于船载稳定平台支撑面的几何中心处,坐标轴 $O_p X_p$ 指向船舶船艏方向, $O_p Y_p$ 指向船舶右舷方向, $O_p Z_p$ 垂直船舶甲板向下;北东坐标系 $\{G\}-O_g X_g Y_g Z_g$ 的坐标原点 O_g 可以位于地球表面任意一点,坐标轴 $O_g X_g$ 指向正北方向, $O_g Y_g$ 指正东方向, $O_g Z_g$ 垂直海面而下。北东坐标系与附体坐标系都遵循右手螺旋定则。

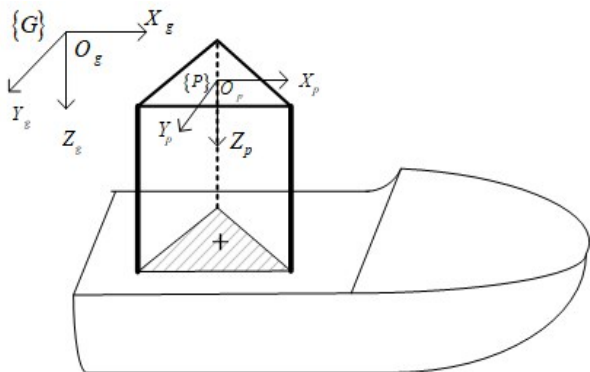


图1 船载稳定平台运动参考系示意图

向量 $x_1 = [z \ \varphi \ \theta]^T$ 表示稳定平台在北东坐标系中的位置向量,包括垂向位置 z 、横摇角 $\varphi \in (-\pi/2, \pi/2)$ 和纵摇角 $\theta \in (-\pi/2, \pi/2)$,船载稳定平台的动力学方程如下^[13]:

$$M(x_1)\ddot{x}_1 + C(x_1, \dot{x}_1)\dot{x}_1 + G(x_1) = \tau + \tau_d \quad (1)$$

式中, $M(x_1)$ 为质量矩阵,满足 $M(x_1) = M^T(x_1)$ 和 $\|M(x_1)\| < M_{\max}$; $C(x_1, \dot{x}_1)$ 为哥氏向心力矩阵; $G(x_1)$ 为重力向量; $\tau = [\tau_1 \ \tau_2 \ \tau_3]^T$ 为控制输入向量,由升沉方向的力 τ_1 ,横摇方向的力矩 τ_2 和纵摇方向的力矩 τ_3 组成; $\tau_d = [\tau_{d1} \ \tau_{d2} \ \tau_{d3}]^T$ 为风浪流等造成的环境扰动,由升沉方向上的扰动力 τ_{d1} ,横摇方向的扰动力矩 τ_{d2} 和纵摇方向的扰动力矩 τ_{d3} 组成。

假设1

1) 矩阵 $M(x_1)$ 、 $C(x_1, \dot{x}_1)$ 和 $G(x_1)$ 均为未知。

2) 环境扰动 $\tau_d = [\tau_{d1} \ \tau_{d2} \ \tau_{d3}]^T$ 是未知时变、有界的,满

足 $|\tau_{di}| \leq p_i^*, i = 1, 2, 3, p_i^*$ 为未知大于零的常数。

本文控制目标是对于船载稳定平台在假设1的条件下设计鲁棒自适应神经网络状态反馈控制律,使稳定平台的垂向位置 z 、横摇角 φ 和纵摇角 θ 达到期望值 $x_{1d} = [z_d \ \varphi_d \ \theta_d]^T$ 的任意小的临域内。与此同时,保证船载稳定平台闭环控制系统的所有信号一致最终有界。

引理1^[14]:对于连续光滑的函数 $f(x)$ 且 $f(0) = 0$,则应用连续函数分离技术与径向基神经网络技术可以得到:

$$f(x) = S(x)Wx + \varepsilon' \quad \forall x \in \Omega_x \subset R^n \quad (2)$$

式中, ε' 为逼近误差,存在着未知的界 ε'' ; l 为神经网络节点的个数; n 为 x 的维数; $S(X) = [s_1(X), s_2(X), \dots, s_l(X)]^T \in R^l$, $s_j(X)$ 具有如下形式:

$$s_j = \exp\left(-\frac{\|X - c_j\|^2}{b_j^2}\right), j = 1, 2, \dots, l \quad (3)$$

$c_j = [c_{j1}, c_{j2}, \dots, c_{jn}]$ 为高斯基函数的中心点向量, $b_j > 0$ 为高斯基函数的宽度向量; A 是理想的权重矩阵,具有如下形式:

$$W = \begin{bmatrix} w_{11}^* & w_{12}^* & \dots & w_{1n}^* \\ w_{21}^* & w_{22}^* & \dots & w_{2n}^* \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ w_{l1}^* & w_{l2}^* & \dots & w_{ln}^* \end{bmatrix}$$

引理2^[15]:对于任意标量 $\delta > 0$ 和 $\chi \in R$,双曲正切函数 $\tanh(\cdot)$,有如下性质:

$$0 \leq |\chi| - \chi \tanh\left(\frac{\chi}{\delta}\right) \leq 0.2785\delta \quad (4)$$

3 控制器设计与稳定性分析

在假设1下,采用自适应技术、径向基神经网络技术与矢量逆推的方法相结合,提出一种鲁棒自适应神经网络控制设计方法,设计船载稳定平台系统控制律,使得稳定平台可以补偿船舶的升沉、横摇和纵摇运动。以下是简要的设计过程。

由式(1)船载稳定平台的动力学方程,可得状态空间表达式如下:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = F(x_1, x_2) + H(x_1)(\tau + \tau_d) \end{cases} \quad (5)$$

式中,

$$F(x_1, x_2) = -M^{-1}(x_1)[C(x_1, x_2)x_2 + G(x_1)], H(x_1) = M^{-1}(x_1).$$

定义误差向量如下:

$$\begin{cases} z_1 = x_1 - x_{1d} \\ z_2 = x_2 - \alpha \end{cases} \quad (6)$$

式中, α 为虚拟控制量,令 $\alpha = -k_1 z_1$, $k_1 = k_1^T$ 为 3×3 阶的设计正定矩阵。

对 z_1 关于时间 t 求导,结合式(6)可得:

$$\dot{z}_1 = \dot{x}_1 - \dot{x}_{1d} = -k_1 z_1 + z_2 \quad (7)$$

选取第一个预选Lyapunov函数:

$$V_1 = \frac{1}{2} z_1^T z_1 \quad (8)$$

将第一个预选Lyapunov函数 V_1 关于时间 t 求导,结合式(7)可得:

$$\dot{V}_1 = z_1^T (\alpha + z_2) \quad (9)$$

对 z_2 关于时间 t 求导,结合式(5)可得:

$$\dot{z}_2 = k_1 x_2 + F(x_1, x_2) + H(x_1)(\tau + \tau_d) \quad (10)$$

设计如下控制律与自适应律:

$$\tau = -z_1 - k_2 z_2 - M \quad (11)$$

$$\dot{\hat{\lambda}}_i = \Gamma_i \left(\frac{z_{2,i}^2 S_i(\bar{x}_{2,i}) S_i^T(\bar{x}_{2,i})}{4r_i^2} + \phi_i(\bar{x}_{2,i}) |z_{2,i}| - \sigma_i (\hat{\lambda}_i - \lambda_i^0) \right), i = 1, 2, 3 \quad (12)$$

式中, $k_2 = k_2^T$ 为 3×3 阶设计正定矩阵; $\sigma_i > 0$ 与 $\delta > 0$ 均为设计参数, 且为常值; $\hat{\lambda}_i$ 与 λ_i^0 分别为 λ_i 的估计与初始值; $M = [M_1 \ M_2 \ M_3]^T$

$$M_i = \frac{z_{2,i} S_i(\bar{x}_{2,i}) S_i^T(\bar{x}_{2,i}) \hat{\lambda}_i}{4r_i^2} + \hat{\lambda}_i \phi_i(\bar{x}_{2,i}) \tanh\left(\frac{\hat{\lambda}_i \phi_i(\bar{x}_{2,i}) z_{2,i}}{\delta}\right), i = 1, 2, 3 \quad (13)$$

其中, $\phi_i(\bar{x}_{2,i}) = 1 + \|S_i(\bar{x}_{2,i})\|$ 。

选取第二个预选 Lyapunov 函数:

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} z_2^T H^{-1}(x_1) z_2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \tilde{\lambda}_i \Gamma_i^{-1} \tilde{\lambda}_i \quad (14)$$

将第二个预选 Lyapunov 函数 V_2 关于时间 t 求导, 结合式(10)与(11)得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 = & -z_1^T k_1 z_1 + z_2^T \left\{ \frac{1}{2} \dot{H}^{-1}(x_1) [x_2 + k_1(x_1 - x_{1d})] - k_2 z_2 \right. \\ & \left. + H^{-1}(x_1) \cdot [F(x_1, x_2) + k_1 x_2] - M + \tau_d \right\} + \sum_{i=1}^3 \tilde{\lambda}_i \Gamma_i^{-1} \dot{\hat{\lambda}}_i \end{aligned} \quad (15)$$

由假设1可知 $F(x_1, x_2)$ 与 $H(x_1)$ 为未知, 因此取:

$$\begin{aligned} f(x_1, x_2) = & \frac{1}{2} \dot{H}^{-1}(x_1) [x_2 + k_1(x_1 - x_{1d})] + \\ & H^{-1}(x_1) [F(x_1, x_2) + k_1 x_2] \end{aligned} \quad (16)$$

需要对不确定项 $f(x_1, x_2)$ 进行逼近, 采用 RBF 网络逼近 $f(x_1, x_2)$, 因此 $f(x_1, x_2) = [f_1(x_1, x_2) \ f_2(x_1, x_2) \ f_3(x_1, x_2)]^T$, 将式(16)代入式(15)中可得:

$$\dot{V}_2 = -z_1^T k_1 z_1 + z_2^T [f(x_1, x_2) + \tau_d - k_2 z_2 - M] + \sum_{i=1}^3 \tilde{\lambda}_i \Gamma_i^{-1} \dot{\hat{\lambda}}_i \quad (17)$$

由引理1可得:

$$\begin{aligned} f_i(\bar{x}_{2,i}) = & S_i(\bar{x}_{2,i}) W_i \bar{x}_{2,i} + \varepsilon_i \\ = & S_i(\bar{x}_{2,i}) \omega_i b_i + S_i(\bar{x}_{2,i}) W_i [y_{d,i} \alpha_i]^T + \varepsilon_i \end{aligned} \quad (18)$$

式中,

$$\bar{x}_{2,i} = [x_{1,i} \ x_{2,i}]^T; b_i = \|W_i\|; \omega_i b_i = W_i \bar{x}_{2,i}; \bar{x}_{2,i} = [z_{1,i} \ z_{2,i}]^T; W_i^m = \frac{W_i}{b_i}$$

令

$$\lambda_i = \max \left\{ b_i^2, \|W_i [y_{d,i} \alpha_i]^T\| \|p_i^* + \varepsilon_i^*\| \right\}, \quad I_i = S_i(\bar{x}_{2,i}) W_i [y_{d,i} \alpha_i]^T +$$

$\tau_{d,i} + \varepsilon_i$, 并且注意到:

$$z_{2,i} S_i(\bar{x}_{2,i}) \omega_i b_i \leq \frac{z_{2,i}^2 S_i(\bar{x}_{2,i}) S_i^T(\bar{x}_{2,i}) \tilde{\lambda}_i}{4r_i^2} + \frac{z_{2,i}^2 S_i(\bar{x}_{2,i}) S_i^T(\bar{x}_{2,i}) \hat{\lambda}_i}{4r_i^2} + r_i^2 \omega_i^T \omega_i$$

$$z_{2,i} I_i \leq \lambda_i \phi_i(\bar{x}_{2,i}) |z_{2,i}| \leq \tilde{\lambda}_i \phi_i(\bar{x}_{2,i}) |z_{2,i}| + \hat{\lambda}_i \phi_i(\bar{x}_{2,i}) |z_{2,i}| \quad (20)$$

式中, 估计误差 $\tilde{\lambda}_i = \lambda_i - \hat{\lambda}_i$ 。

结合式(12)(13)(19)和(20)得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 \leq & -z_1^T k_1 z_1 - z_2^T k_2 z_2 + \sum_{i=1}^3 \frac{z_{2,i}^2 S_i(\bar{x}_{2,i}) S_i^T(\bar{x}_{2,i}) \tilde{\lambda}_i}{4r_i^2} + \sum_{i=1}^3 r_i^2 \omega_i^T \omega_i + \sum_{i=1}^3 \tilde{\lambda}_i \phi_i(\bar{x}_{2,i}) |z_{2,i}| \\ & + \sum_{i=1}^3 \left[\tilde{\lambda}_i \phi_i(\bar{x}_{2,i}) |z_{2,i}| + \hat{\lambda}_i \phi_i(\bar{x}_{2,i}) z_{2,i} \tanh\left(\frac{\hat{\lambda}_i \phi_i(\bar{x}_{2,i}) z_{2,i}}{\delta}\right) \right] - \sum_{i=1}^3 \tilde{\lambda}_i \Gamma_i^{-1} \dot{\hat{\lambda}}_i \\ \leq & -z_1^T k_1 z_1 - z_2^T k_2 z_2 + \sum_{i=1}^3 r_i^2 \omega_i^T \omega_i + \sum_{i=1}^3 \sigma_i \tilde{\lambda}_i (\hat{\lambda}_i - \lambda_i^0) \\ & + \sum_{i=1}^3 \left[\hat{\lambda}_i \phi_i(\bar{x}_{2,i}) |z_{2,i}| + \hat{\lambda}_i \phi_i(\bar{x}_{2,i}) z_{2,i} \tanh\left(\frac{\hat{\lambda}_i \phi_i(\bar{x}_{2,i}) z_{2,i}}{\delta}\right) \right] \end{aligned} \quad (21)$$

由引理2有:

$$0 \leq \hat{\lambda}_i \phi_i(\bar{x}_{2,i}) |z_{2,i}| + \hat{\lambda}_i \phi_i(\bar{x}_{2,i}) z_{2,i} \tanh\left(\frac{\hat{\lambda}_i \phi_i(\bar{x}_{2,i}) z_{2,i}}{\delta}\right) \leq 0.2785\delta \quad (22)$$

另外:

$$r_i^2 \omega_i^T \omega_i \leq r_i^2 \|W_i^m\|^2 \|\bar{x}_{2,i}\|^2 \leq r_i^2 \|\bar{x}_{2,i}\|^2 \leq r_i^2 z_{1,i}^2 + r_i^2 z_{2,i}^2 \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \sigma_i \tilde{\lambda}_i (\hat{\lambda}_i - \lambda_i^0) \leq & -\frac{\sigma_i \tilde{\lambda}_i \tilde{\lambda}_i}{2} + \frac{\sigma_i (\lambda_i - \lambda_i^0)^2}{2} \\ \leq & -a_i \tilde{\lambda}_i \Gamma_i^{-1} \tilde{\lambda}_i + \frac{\sigma_i (\lambda_i - \lambda_i^0)^2}{2} \end{aligned} \quad (24)$$

式中, $\frac{\sigma_i}{2\lambda_{\max}(\Gamma_i^{-1})} \geq a_i$ 。

因此有:

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 \leq & -z_1^T k_1 z_1 - z_2^T k_2 z_2 + \sum_{i=1}^3 (r_i^2 z_{1,i}^2 + r_i^2 z_{2,i}^2) + \\ & \sum_{i=1}^3 \left(-\frac{\sigma_i \tilde{\lambda}_i \tilde{\lambda}_i}{2} + \frac{\sigma_i (\lambda_i - \lambda_i^0)^2}{2} \right) + 0.8355\delta \\ \leq & -z_1^T (k_1 - r^2) z_1 - z_2^T (k_2 - r^2) z_2 - \\ & a_0 \sum_{i=1}^3 (\tilde{\lambda}_i^T \Gamma_i^{-1} \tilde{\lambda}_i) + \sum_{i=1}^3 \left(\frac{\sigma_i (\lambda_i - \lambda_i^0)^2}{2} \right) + 0.8355\delta \end{aligned} \quad (25)$$

式中, $r^2 = \text{diag}(r_1^2, r_2^2, r_3^2)$, $a_0 = \min\{a_1, a_2, a_3\}$ 。

选取合适的参数使得 $\lambda_{\min}(k_1 - r^2) > 0$ 和 $\lambda_{\min}(k_2 - r^2) > 0$ 成立, 结合式(25)得到:

$$\dot{V}_3 \leq -2\mu V_3 + C \quad (26)$$

式中, $\mu = \min\left\{2\lambda_{\min}(k_1 - r^2), \frac{2}{M_{\max}} \lambda_{\min}(k_2 - r^2), a_0\right\}$;

$$C = \sum_{i=1}^3 \frac{\sigma_i (\lambda_i - \lambda_i^0)^2}{2} + 0.8355\delta。$$

可得:

$$V_3 \leq \frac{C}{2\mu} + \left(V_3(0) - \frac{C}{2\mu} \right) e^{-2\mu t} \quad (27)$$

显然, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, V_3 收敛于 $C/(2\mu)$, 即船载稳定平台系统

中的所有信号一致最终有界。此外,选择恰当的控制参数能使误差 z_i 任意小。

4 仿真研究

在这一节中我们的控制目标是船载稳定平台的升沉运动幅值为零,垂向的位置保持在2米,横摇和纵摇角度为0,即 $x_{1d} = [2m \ 0^\circ \ 0^\circ]^T$,选取系统的初始状态分别为 $x_1(0) = [2.2m \ 1^\circ \ 2^\circ]^T$ 及 $x_2(0) = [0m/s \ 0^\circ/s \ 0^\circ/s]^T$ 。船舶在海洋中航行,其遭受海浪时的船舶姿态不仅与船型,还与海况、风速、航速、遭遇角等众多因素有关,一般可以通过试验和仿真来获得船舶的运动姿态,但此类研究数据很少能够在公开文献中找到。例如,对于排水量为万吨级别的航空母舰及超大型油轮以30kn的典型速度行驶时,由海浪、风等因素产生的甲板运动模型可描述为:

$$\text{升沉运动(m)}: n = 1.22\sin(0.6t) + 0.3\sin(0.2t) + 2$$

$$\text{横摇运动}(\circ): \alpha = 2.5\sin(0.5t) + 3.0\sin(0.52t) + 0.5$$

$$\text{纵摇运动}(\circ): \beta = 0.5\sin(0.6t) + 0.3\sin(0.63t) + 0.25$$

以文献[16]稳定平台为例进行仿真研究,该平台的相关参数如表1所示。

表1 船载稳定平台结构参数

符号	名称	数值
r_p	支撑圆面半径	0.56m
m_p	支撑面质量	330kg
I_x	支撑面对 X_p 轴的转动惯量	$10.59kg \cdot m^2$
I_y	支撑面对 X_p 轴的转动惯量	$10.59kg \cdot m^2$
I_z	支撑面对 X_p 轴的转动惯量	$10.59kg \cdot m^2$

控制器的相关参数的选择如下,首先对于径向基神经网络的节点数、中心点向量值以及宽度向量进行选择:节点 $l = 50$,中心点向量值 $c_j(j = 1, 2, \dots, l)$ 均匀的分布在 $[-1, 1] \times [-1, 1] \times [-1, 1] \times [-1, 1]$,高斯基函数的宽度 $b_j = 2$ ($j = 1, 2, \dots, l$);另外一些设计参数以及初始值选取去下: $k_1 = \text{diag}(5, 0.1, 0.1)$, $k_2 = \text{diag}(250, 5, 5)$, $\Gamma_1 = \Gamma_2 = \Gamma_3 = 0.5$, $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = 1$, $r_1 = 1$, $r_2 = r_3 = 0.5$, $\delta = 0.1$ 。仿真结果如下,其中图2、3、4分别为船载稳定平台在升沉、横摇和纵摇方向上的运动曲线,其中实线为施加控制时船载稳定平台的运动曲线,点画线为未控制时船载稳定平台的运动曲线,可以看出进行主动控制之后的船载稳定平台与未进行控制相比运动幅度大幅降低,使得船载稳定平台满足一些机器设备安全作业的要求,可以有效延长船舶海上作业时间,提高经济效益。图5、6、7分别表示对船载稳定平台主动控制时,船载稳定平台在升沉、横摇和纵摇方向上受到的力以及力矩的历时曲线。

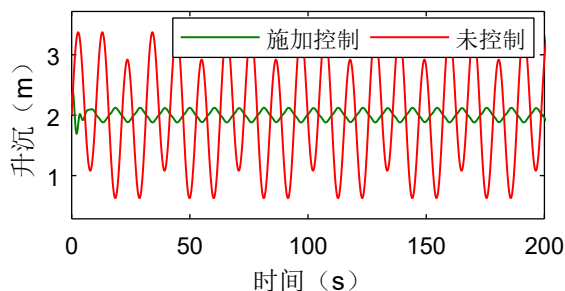


图2 船载稳定平台升沉方向运动曲线

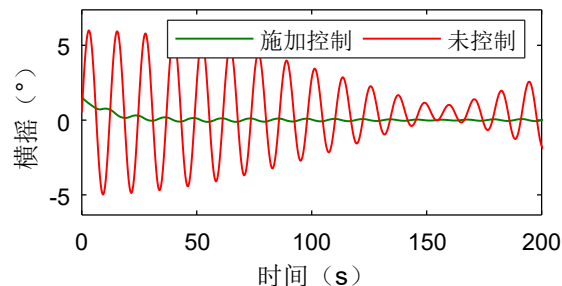


图3 船载稳定平台横摇方向运动曲线

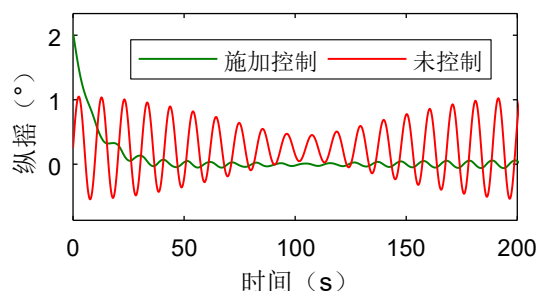


图4 船载稳定平台纵摇方向运动曲线图

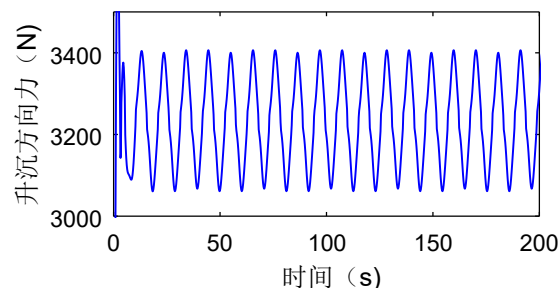


图5 船载稳定平台升沉方向控制信号历时曲线

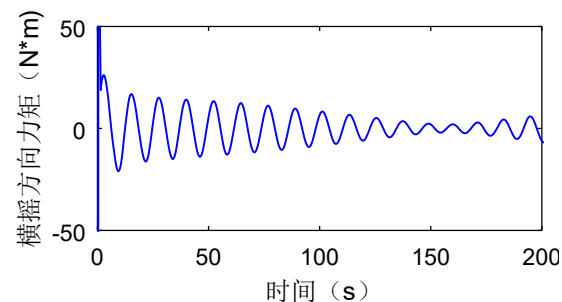


图6 船载稳定平台横摇方向控制信号历时曲线

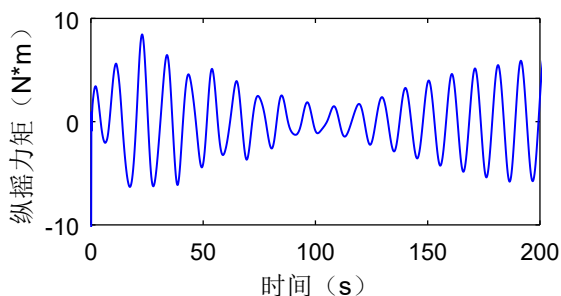


图8 船载稳定平台纵摇方向控制信号历时曲线

4 结论

本文讨论了船载稳定平台存在着未建模动态等不确定性以及未知时变环境扰动时,船载稳定平台升沉、横摇和纵摇三自由度的控制问题。采用了自适应技术、径向基神经网络技术与矢量逆推相结合,设计了稳定平台的平稳控制律。对于稳定平台系统的未建模动态等不确定性,运用径向基神经网络技术进行估计及补偿;对于径向基神经网络相关参数及环境扰动的上界,利用自适应技术在线估计;同时采用了最少学习参数的方法减小控制器的计算负担。理论分析表明了稳定平台的稳定误差可以任意小,同时稳定平台闭环控制系统中所有信号全局一致最终有界。数值仿真结果验证了稳定平台稳定控制律的有效性。

参考文献:

- [1] 阎洁,唐建中,史维祥,等.FUZZY控制在舰载雷达稳定平台伺服系统中的应用[J].兵工学报,1999,20(2):182-185.
- [2] 杨蒲,李奇.陀螺稳定平台非线性摩擦的灰色滑模控制[J].系统工程与电子技术,2008,30(7):1328-1332.
- [3] 邝平,李军,雷阳,等.高精度稳定平台伺服系统的自抗扰控制[J].工业仪表与自动化装置,2016(1):14-18.
- [4] 丛爽,孙光立,邓科,等.陀螺稳定平台扰动的自抗扰及其滤波

- 控制[J].光学精密工程,2016,24(1):169-177.10.3788/ope.20162401.0169
- [5] 李伟.船舶液压稳定平台的设计与分析[D].大连:大连海事大学,2010.
- [6] 詹银芳.船载三轴稳定控制系统的研究与设计[D].南京:南京理工大学,2013.
- [7] Zeng Z G, Chen G H. Adaptive predictive based on equal-dimension and new information for the hydraulic mechanism of wave motion compensating platform[J]. Applied Mechanics and Materials, 2010, 20/21/22/23: 236-242.
- [8] 李猛.两轴船载稳定平台控制系统设计与研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.
- [9] 陈远明,叶家玮,宋鑫.波浪运动补偿稳定平台系统液压机构的仿真试验[J].船海工程,2007,36(6):103-106.
- [10] 王建.并联型三自由度波浪补偿稳定平台关键技术研究[D].镇江:江苏科技大学,2014.
- [11] 鲍晓华.两自由度舰载并联稳定平台的设计与仿真研究[D].秦皇岛:燕山大学,2011.
- [12] De Zeeuw W.A. Ship motion compensation platform for high payloads[D]. Delft: Delft University of Technology, 2012.
- [13] 何景峰.液压驱动六自由度并联机器人特性及其控制策略研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.
- [14] Zhang G, Zhang X. A novel DVS guidance principle and robust adaptive path-following control for underactuated ships using low frequency gain-learning[J]. Isa Transactions, 2015, 56: 75-85.
- [15] Polycarpou M M, Ioannou P A. A robust adaptive nonlinear control design[J]. Automatica, 1996, 32(3): 423-427.
- [16] 刘晓.并联6-PUS舰载稳定平台机构学基础理论与实验研究[D].秦皇岛:燕山大学,2014.

【通联编辑:梁书】

(上接第8页)

5)如图17所示,选择FPGA配置文件和CDC文件,点击OK,下载配置文件。导入CDC文件的好处是:所观察的信号自动分组命名,方便信号观察。

6)双击Trigger Setup和Waveform,得到两个窗口。按F5键,开始进行信号采样,采样完毕后得到如图18的波形。从图中可见,这些结果正是预期的结果,说明被测试的CPU通过了测试。

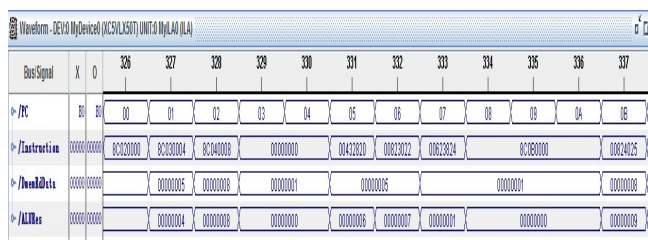


图18 观察运行的波形

5 结语

MIPS在RISC处理器方面占有重要地位,在20世纪90年代末,MIPS公司把战略重点放在嵌入式系统,发布了MIPS32和MIPS64架构标准,为未来MIPS处理器的开发奠定了基础。而Xilinx公司的FPGA板卡和Vivado工具,为设计一台MIPS CPU提供了软硬件平台,有条件最终下载到Nexys4-DDR平台上,并通过ChipScope工具抓取FPGA运行过程中产生的波形进行验证。

参考文献:

- [1] 张冬冬,王力生,郭玉臣.数字逻辑与组成原理实践教程[M].北京:清华大学出版社,2018.
- [2] 何宾.Xilinx FPGA权威设计指南:Vivado 2014集成开发环境[M].北京:电子工业出版社,2015.
- [3] 廉玉欣,侯博雅,王猛.Vivado入门与FPGA设计实例[M].北京:电子工业出版社,2018.

【通联编辑:梁书】

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net