

控制方向未知条件下不确定船舶航向鲁棒 λ 调节控制

田佰军, 刘正江, 郑云峰

(大连海事大学 航海学院, 辽宁 大连 116026)

摘要: 为了改善模型中控制方向未知和受外界环境干扰的船舶航向保持控制问题, 将 Nussbaum 增益技术引入到 Backstepping 方法中, 得到一种可人为指定稳态控制的新型鲁棒 λ 调节控制方法. 考虑到一般系统中 Nussbaum 积分乘性函数为时变函数, 通过利用 Nussbaum 函数不变性构建新的积分形式, 充分利用船舶模型内部结构特征, 提高该算法理论证明的严谨性. 所提出的算法能够解决船舶航向保持控制中控制方向未知条件下指定稳态性能控制问题. 最后, 通过仿真实验验证了所得出的上述控制方法的可行性.

关键词: 船舶; 航向保持控制; Backstepping; 控制方向未知

中图分类号: U661.32+1

文献标志码: A

Robust λ adaptive control for uncertain ship course keeping with unknown control direction

TIAN Bai-jun, LIU Zheng-jiang, ZHENG Yun-feng

(Navigation College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China. Correspondent: TIAN Bai-jun, E-mail: 18900982579@163.com)

Abstract: In order to supplement the control design for the ship course keeping system with the unknown control direction and external nonzero time-varying disturbances, a robust λ adaptive control scheme is developed by introducing the Nussbaum technique into the popular Backstepping method. By employing the internal structural characters of marine ships, the novel integral form is derived by employing the invariance property of the Nussbaum function, which is to attenuate the defect of the time-varying multiplicative function. The proposed method can solve the steady-state performance control problem for the ship course keeping system with the unknown control direction. Numerical simulation results show the effectiveness of the proposed scheme.

Keywords: ship; course keeping control; Backstepping; unknown control direction

0 引言

船舶运动控制是控制理论在航海领域的重要应用, 其方向是推动船舶朝着自动化、智能化更高水平发展, 从而促进船舶航行安全水平、经济性能和舒适程度的提高^[1-2]. 海上行船不可避免地存在很多未知不确定、航行危险以及风、浪、流等海洋干扰^[3], 这给船舶自动化技术发展和控制理论工程实现带来了更多困难. 为了进一步改善船舶航向保持控制系统的控制性能, 控制方向不确定问题逐渐引起相关研究者的关注. 在已有理论研究中, Kaloust 等^[4]最早将 Backstepping 方法应用于控制方向未知的相关问题的处理上, 利用鲁棒技术设计出“转移自适应律”控制策略, 针对整个闭环控制系统的稳定性, 利用 Lyapunov 稳定性理论进行分析, 但该研究中并未使用

Nussbaum 增益函数; 在文献 [5] 中, Nussbaum 提出了 Nussbaum 增益技术, 使线性系统中控制系数符号未知这一问题得以解决; 文献 [6-7] 结合了 Nussbaum 增益技术和 Backstepping 技术, 将其应用到多个控制方向未知的严反馈非线性系统研究中, 得出的自适应控制设计方案具有全局稳定性; 进一步的研究结果被拓展到多智能体系统^[8]和分布式网络系统^[9]; 在工程实际系统中, 文献 [10] 运用 Nussbaum 增益技术, 结合正交参数投影技术构造了高超声速飞行器的鲁棒自适应输出反馈控制律, 解决了实际系统的有效跟踪问题. 控制方向未知的系统在船舶控制工程实践中是广泛存在的, 如船舶航向、航迹保持控制系统^[11-12].

为此, 本文针对一般不确定的严反馈系统, 考虑到符号未知的时变控制增益不确定项的影响, 将

收稿日期: 2015-08-01; **修回日期:** 2015-12-31.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51179019).

作者简介: 田佰军(1970—), 男, 副教授, 博士, 从事非线性控制、船舶货运关键技术等研究; 刘正江(1959—), 男, 教授, 博士生导师, 从事船舶运动控制、综合安全评估等研究.

Nussbaum 增益技术引入到 Backstepping 方法中, 得到一种可人为指定稳态控制的新型鲁棒 λ 调节控制方法. 与传统 Nussbaum 设计方法不同, 该算法构建一种新的 Nussbaum 不变性引理, 设计过程能够确保稳态的误差边界一致收敛到一个指定区域中, 同时保证闭环控制系统中所有信号满足一致最终有界条件. 以大连海事大学远洋教学实习船“育鲲”轮为例开展仿真实验, 仿真结果验证了该算法的有效性.

1 问题描述

本文针对如下具有控制方向未知的一类严反馈非线性系统进行研究:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = g_1(x_1)x_2 + f_1(x_1, t), \\ \dot{x}_2 = g_2(\bar{x}_2)x_3 + f_2(\bar{x}_2, t), \\ \vdots \\ \dot{x}_n = g_n(\mathbf{x})u + f_n(\mathbf{x}, t). \end{cases} \quad (1)$$

其中: $\bar{x}_i = [x_1, x_2, \dots, x_i]^T \in R^i$, $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \in R^n$ 是系统状态变量; $u \in R$ 是控制输入; $y \in R$ 是系统输出; $g_i(\bar{x}_i)$ 、 $f_i(\bar{x}_i, t)$ 分别是系统控制增益函数和系统漂移函数, 二者均为连续的未知非线性函数. 需要强调的是: 式(1)所描述的被控对象不但具有一般不确定性(即存在漂移不确定和控制增益函数不确定), 而且控制增益函数符号也未知, 也就是所谓的“控制方向未知”. 这样, 式(1)所描述的系统更具一般性, 在此基础上进行控制器设计在控制工程实际中会有更广泛的应用.

为了便于开展本文控制器设计及稳定性分析工作, 对如式(1)所示的不确定非线性系统作以下假设:

假设 1 系统中漂移不确定函数为 $f_i(\cdot)$, 存在未知的常数 $b_i > 0$ 和已知的光滑函数 $\rho_i(x_1, x_2, \dots, x_i)$, 使以下不等式成立, 即 $\forall (\bar{x}_i, t) \in R^{i+1}, \exists |f_i(\bar{x}_i, t)| \leq b_i \rho_i(x_1, x_2, \dots, x_i), 1 \leq i \leq n$.

假设 2 参考信号 $y_r(t)$ 及导数 $\dot{y}_r(t)$ 在 $t \in [0, \infty)$ 上存在且有界, 即 $|y_r(t)| \leq \bar{b}_0, |\dot{y}_r(t)| \leq b_0, \forall t \geq 0$.

假设 3 系统控制增益函数 $g_i(\cdot)$ 未知且其符号未知, 即系统控制方向未知. 存在未知常数 $m_i, M_i > 0$ 和非线性函数 $\sigma_i(\bar{x}_i)$, 使 $0 < m_i \sigma_i(\bar{x}_i) \leq |g_i(\bar{x}_i)| \leq M_i \sigma_i(\bar{x}_i)$ 成立, 其中 $\sigma_i(\bar{x}_i)$ 为已知的光滑非线性函数.

2 考虑符号未知增益函数不确定的鲁棒 λ 调节控制

2.1 控制器设计

本文将利用 Lyapunov 稳定性理论、Backstepping 设计方法和鲁棒 λ 调节设计技术实现同时考虑系统漂移不确定和符号未知的控制增益函数不确定条件下的鲁棒自适应控制器设计工作. 为了处理系统控制增益方向未知问题, 本节引入 Nussbaum 函数 $\mathcal{N}: \zeta \rightarrow \zeta^2 \cos(\zeta)$, 即具有如下 Nussbaum 特性的光滑连续

函数:

$$\begin{cases} \limsup_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{\tau} \int_0^\tau \mathcal{N}(\zeta) d\zeta = +\infty, \\ \limsup_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{\tau} \int_0^\tau \mathcal{N}(\zeta) d\zeta = -\infty. \end{cases} \quad (2)$$

以下为控制器设计过程:

Step 1 定义如下误差变量:

$$z_1 = x_1 - y_r, \quad (3)$$

$$z_2 = x_2 - \alpha_1, \quad (4)$$

其中 α_1 为用于镇定 z_1 子系统设计的虚拟控制律. 对 z_1 求导, 可得

$$\dot{z}_1 = g_1(x_1)x_2 + f_1(x_1, t) - \dot{y}_r. \quad (5)$$

同样地, 本文构建不同于传统 Backstepping 方法的 Lyapunov 能量函数, 给出用于控制器设计的分段连续可微 Lyapunov 函数如下:

$$V_1(z_1) = \begin{cases} \frac{1}{2}(|z_1| - \lambda_1)^2, & |z_1| \geq \lambda_1; \\ 0, & |z_1| < \lambda_1. \end{cases} \quad (6)$$

其中 λ_1 为设计参数, 即鲁棒 λ 调节设计中指定镇定边界为 $[-\lambda_1, \lambda_1]$. 对 $V_1(z_1)$ 求导, 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_1(z_1) &= \Delta V_1(z_1) \dot{z}_1 = \\ &= \Delta V_1(z_1)(g_1(x_1)x_2 + f_1(x_1, t) - \dot{y}_r) \leq \\ &= \Delta V_1(z_1)g_1(x_1)\alpha_1 + |\Delta V_1(z_1)||f_1(x_1, t) - \dot{y}_r| + \\ &= |\Delta V_1(z_1)||g_1(x_1)z_2|. \end{aligned} \quad (7)$$

$$\Delta V_1(z_1) = \begin{cases} (|z_1| - \lambda_1)\text{sign}(z_1), & |z_1| \geq \lambda_1; \\ 0, & |z_1| < \lambda_1. \end{cases} \quad (8)$$

由假设 1 ~ 假设 3 可得, 式(7)中 $|f_1(x_1, t) - \dot{y}_r| \leq b_1 \rho_1(x_1) + b_0 \leq \theta_1 \beta_1(x_1)$. 其中: $\beta_1(x_1) = 1 + \rho_1(x_1) + \sigma_1(x_1)$ 为连续可微非线性函数, $\theta_1 = \max(b_1, b_0)$ 为未知常数, 需要进行在线估计, 用于虚拟控制量的设计.

设计第 1 个虚拟控制函数

$$\alpha_1(x_1, y_r, k_1) = \mathcal{N}(k_1)\beta_1(x_1)\text{sig}_{\lambda_1}(z_1)/\sigma_1(x_1). \quad (9)$$

其中: $\text{sig}_{\lambda}(\cdot)$ 为连续可微函数, 具体表达为

$$\begin{cases} \text{sig}_{\lambda}(\xi) = 1, & \xi \geq \lambda; \\ \text{sig}_{\lambda}(\xi) = -1, & \xi \leq -\lambda; \\ \text{sig}_{\lambda}(\xi) = \sin(\pi\xi/2\lambda), & -\lambda < \xi < \lambda. \end{cases} \quad (10)$$

$k_1(t)$ 为构造虚拟控制所引入的 Nussbaum 参数, 其自适应律设计为

$$\dot{k}_1 = \begin{cases} \gamma_1 \beta_1(x_1)(|z_1| - \lambda_1), & |z_1| \geq \lambda_1; \\ 0, & |z_1| < \lambda_1. \end{cases} \quad (11)$$

γ_1 为设计参数.

将式(11)代入(7), 进一步整理, 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &\leq |\Delta V_1(z_1)| \frac{g_1(x_1)}{\sigma_1(x_1)} \mathcal{N}(k_1)\beta_1(x_1) + \\ &= \theta_1 |\Delta V_1(z_1)| \beta_1(x_1) + |g_1(x_1)||z_2| |\Delta V_1(z_1)|. \end{aligned} \quad (12)$$

由于控制增益函数 $g_1(x_1)$ 存在关系 $m_1\sigma_1(x_1) \leq |g_1(x_1)| \leq M_1\sigma_1(x_1)$, 根据 Nussbaum 函数不变性引理, 如下不等式成立:

$$\frac{g_1(x_1)}{\sigma_1(x_1)}\mathcal{N}(k_1) \leq \mathcal{N}_1^*(k_1) = \begin{cases} \max\{\text{sign}(g_1(x_1))m_1, \text{sign}(g_1(x_1))M_1\}\mathcal{N}(k_1), \\ \mathcal{N}(k_1) \geq 0; \\ \min\{\text{sign}(g_1(x_1))m_1, \text{sign}(g_1(x_1))M_1\}\mathcal{N}(k_1), \\ \mathcal{N}(k_1) < 0. \end{cases} \quad (13)$$

函数 $\mathcal{N}_1^*(k_1)$ 为定义的一个新的 Nussbaum 函数, 即无论 $g_1(x_1)$ 大于零或小于零, 式 (13) 均成立.

进一步, 可将式 (12) 整理为

$$\dot{V}_1 \leq \gamma_1^{-1}(\mathcal{N}_1^*(k_1) + \theta_1)\dot{k}_1 + M_1\sigma_1(x_1)|z_2||\Delta V_1(z_1)|. \quad (14)$$

Step i 定义第 i 个误差变量为

$$z_i = x_i - \alpha_{i-1}, \quad (15)$$

对 z_i 求导可得

$$\dot{z}_i = g_i(\bar{x}_i)x_{i+1} + f_i(\bar{x}_i, t) - \dot{\alpha}_{i-1}(x_1, x_2, \dots, x_{i-1}, y_r, k_1, k_2, \dots, k_{i-1}). \quad (16)$$

定义第 i 个子系统的 Lyapunov 函数

$$V_i(z_i) = \begin{cases} \frac{1}{2}(|z_i| - \lambda_i)^2, & |z_i| \geq \lambda_i; \\ 0, & |z_i| < \lambda_i. \end{cases} \quad (17)$$

对式 (17) 求导, 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_i(z_i) &= \Delta V_i(z_i)\dot{z}_i = \\ &\Delta V_i(z_i)(g_i(\bar{x}_i)x_{i+1} + f_i(\bar{x}_i, t) - \\ &\dot{\alpha}_{i-1}(x_1, x_2, \dots, x_{i-1}, y_r, k_1, k_2, \dots, k_{i-1})) \leq \\ &\Delta V_i(z_i)g_i(\bar{x}_i)\alpha_i + |\Delta V_i(z_i)||f_i(\bar{x}_i, t) - \\ &\dot{\alpha}_{i-1}(\cdot)| + |\Delta V_i(z_i)|g_i(\bar{x}_i). \end{aligned} \quad (18)$$

其中

$$\Delta V_i(z_i) = \begin{cases} (|z_i| - \lambda_i)\text{sign}(z_i), & |z_i| \geq \lambda_i; \\ 0, & |z_i| < \lambda_i. \end{cases} \quad (19)$$

基于假设 1 ~ 假设 3 和 $i - 1$ 步中设计的虚拟控制律 $\alpha_{i-1}(\cdot)$, 可对式 (18) 中的 $|f_i(\bar{x}_i, t) - \dot{\alpha}_{i-1}(\cdot)|$ 进行放缩处理, 即

$$\begin{aligned} &|f_i(\bar{x}_i, t) - \dot{\alpha}_{i-1}(\cdot)| \leq \\ &|f_i(\bar{x}_i, t)| + \sum_{j=1}^{i-1} \left| \frac{\partial \alpha_{i-1}}{\partial x_j} \right| [|g_j(\bar{x}_j)||x_{j+1}| + |f_j(\bar{x}_j, t)|] + \\ &\left| \frac{\partial \alpha_{i-1}}{\partial y_r} \right| |\dot{y}_r| + \sum_{j=1}^{i-1} \left| \frac{\partial \alpha_{i-1}}{\partial k_j} \right| \dot{k}_j \leq \\ &b_i \rho_i(\bar{x}_i) + \sum_{j=1}^{i-1} \left| \frac{\partial \alpha_{i-1}}{\partial x_j} \right| [M_j \sigma_j(\bar{x}_j)|x_{j+1}| + b_j \rho_j(\bar{x}_j)] + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\left| \frac{\partial \alpha_{i-1}}{\partial y_r} \right| b_0 + \sum_{j=1}^{i-1} \left| \frac{\partial \alpha_{i-1}}{\partial k_j} \right| w_j(\cdot) \leq \\ &\theta_i \beta'_i(x_1, x_2, \dots, x_{i-1}, y_r, k_1, k_2, \dots, k_{i-1}). \end{aligned} \quad (20)$$

其中: $\beta'_i(\cdot) = \rho_i(\bar{x}_i) + \left| \frac{\partial \alpha_{i-1}}{\partial y_r} \right| + \sum_{j=1}^{i-1} \left[\left| \frac{\partial \alpha_{i-1}}{\partial x_j} \right| (\sigma_j(\bar{x}_i) \times |x_{j+1}|) + \rho_j(\bar{x}_j) + \left| \frac{\partial \alpha_{i-1}}{\partial k_j} \right| w_j(\cdot) \right] + \sigma_i(\bar{x}_i)$ 为通过推理可以得到的非线性函数, 即形式已知; $\theta_i = \max\{1, b_0, b_1, \dots, b_i, M_1, \dots, M_i\}$ 为未知常量.

根据以上分析, 直接给出虚拟控制律 α_i , 即

$$\alpha_i(\bar{x}_i, y_r, \bar{k}_i) = \mathcal{N}(k_i)\beta_i(\cdot)\text{sig}_{\lambda_i}(z_i)/\sigma_i(\bar{x}_i). \quad (21)$$

其中 $\beta_i(\cdot)$ 为满足下式的连续可微函数:

$$\beta_i(\cdot) \geq 1 + \beta'_i(x_1, x_2, \dots, x_i, y_r, k_1, k_2, \dots, k_{i-1}). \quad (22)$$

所引入的 Nussbaum 函数中参数 $k_i(t)$ 的自适应律为

$$\dot{k}_i = \begin{cases} \gamma_i \beta_i(x_1, \dots, x_i, y_r, k_1, \dots, k_{i-1})(|z_i| - \lambda_i), \\ |z_i| \geq \lambda_i; \\ 0, & |z_i| < \lambda_i. \end{cases} \quad (23)$$

将虚拟控制变量 α_i 代入式 (18), 并进行整理, 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_i(z_i) &\leq |\Delta V_i(z_i)| \frac{g_i(\bar{x}_i)}{\sigma_i(\bar{x}_i)} \mathcal{N}(k_i)\beta_i(\cdot) + \theta_i |\Delta V_i(z_i)| \beta_i(\cdot) + \\ &|g_i(\bar{x}_i)||z_{i+1}||\Delta V_i(z_i)|. \end{aligned} \quad (24)$$

由假设 3 可以看出, 控制增益函数 $g_i(x_i)$ 满足 $m_i\sigma_i(x_i) \leq |g_i(x_i)| \leq M_i\sigma_i(x_i)$. 与 Step 1 中推导同理, 如下不等式成立, 函数 $\mathcal{N}_i^*(k_i)$ 为 Step i 中定义的一个新的 Nussbaum 函数:

$$\begin{aligned} \frac{g_i(\bar{x}_i)}{\sigma_i(\bar{x}_i)}\mathcal{N}(k_i) &\leq \mathcal{N}_i^*(k_i) = \\ &\begin{cases} \max\{\text{sign}(g_i(\bar{x}_i))m_i, \text{sign}(g_i(\bar{x}_i))M_i\}\mathcal{N}(k_i), \\ \mathcal{N}(k_i) \geq 0; \\ \min\{\text{sign}(g_i(\bar{x}_i))m_i, \text{sign}(g_i(\bar{x}_i))M_i\}\mathcal{N}(k_i), \\ \mathcal{N}(k_i) < 0. \end{cases} \end{aligned} \quad (25)$$

结合式 (23), 给出参数 k_i 的自适应律中对 $|z_i| \geq \lambda_i$ 情况的设计, 可将式 (24) 中相关变量进行归纳, 最终得到

$$\dot{V}_i \leq \gamma_i^{-1}(\mathcal{N}_i^*(k_i) + \theta_i)\dot{k}_i + M_i\sigma_i(\bar{x}_i)|z_{i+1}||\Delta V_i(z_i)|. \quad (26)$$

Step n 定义如下第 n 个误差变量:

$$z_n = x_n - \alpha_{n-1}, \quad (27)$$

对其求导, 可得

$$\begin{aligned} \dot{z}_n &= g_n(\mathbf{x})x_{n+1} + f_n(\mathbf{x}, t) - \\ &\dot{\alpha}_{n-1}(x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, y_r, k_1, k_2, \dots, k_{n-1}). \end{aligned} \quad (28)$$

定义第 n 个子系统的如下 Lyapunov 函数:

$$V_n(z_n) = \begin{cases} \frac{1}{2}(|z_n| - \lambda_n)^2, & |z_n| \geq \lambda_n; \\ 0, & |z_n| < \lambda_n. \end{cases} \quad (29)$$

对其求导可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_n(z_n) &= \Delta V_n(z_n)\dot{z}_n = \\ \Delta V_n(z_n)(g_n(\mathbf{x})x_{n+1} + f_n(\mathbf{x}, t) - \dot{\alpha}_{n-1}(\cdot)) &\leq \\ \Delta V_n(z_n)g_n(\mathbf{x})\alpha_n + \\ |\Delta V_n(z_n)||f_n(\mathbf{x}, t) - \dot{\alpha}_{n-1}(\cdot)| + |\Delta V_n(z_n)|g_n(\mathbf{x}). \end{aligned} \quad (30)$$

其中

$$\Delta V_n(z_n) = \begin{cases} (|z_n| - \lambda_n)\text{sign}(z_n), & |z_n| \geq \lambda_n; \\ 0, & |z_n| < \lambda_n. \end{cases} \quad (31)$$

在第 $n-1$ 步中设计的虚拟控制律 $\alpha_{n-1}(\cdot)$ 的基础上, 可对式 (30) 中的 $|f_n(\bar{x}_n, t) - \dot{\alpha}_{n-1}(\cdot)|$ 进行放缩处理, 即

$$\begin{aligned} |f_n(\bar{x}_n, t) - \dot{\alpha}_{n-1}(\cdot)| &\leq \\ |f_n(\bar{x}_n, t)| + \sum_{j=1}^{n-1} \left| \frac{\partial \alpha_{n-1}}{\partial x_j} \right| &[|g_j(\bar{x}_j)||x_{j+1}| + |f_j(\bar{x}_j, t)|] + \\ \left| \frac{\partial \alpha_{n-1}}{\partial y_r} \right| |\dot{y}_r| + \sum_{j=1}^{n-1} \left| \frac{\partial \alpha_{n-1}}{\partial k_j} \right| &\dot{k}_j \leq \\ b_n \rho_n(\bar{x}_n) + \sum_{j=1}^{n-1} \left| \frac{\partial \alpha_{n-1}}{\partial x_j} \right| &[M_j \sigma_j(\bar{x}_j)|x_{j+1}| + b_j \rho_j(\bar{x}_j)] + \\ \left| \frac{\partial \alpha_{n-1}}{\partial y_r} \right| b_0 + \sum_{j=1}^{n-1} \left| \frac{\partial \alpha_{n-1}}{\partial k_j} \right| &w_j(\cdot) \leq \\ \theta_n \beta'_n(x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, y_r, k_1, k_2, \dots, &k_{n-1}). \end{aligned} \quad (32)$$

其中

$$\begin{aligned} \beta'_n(\cdot) &= \rho_n(\bar{x}_n) + \left| \frac{\partial \alpha_{n-1}}{\partial y_r} \right| + \sigma_n(\bar{x}_n) + \\ &\sum_{j=1}^{n-1} \left[\left| \frac{\partial \alpha_{n-1}}{\partial x_j} \right| (\sigma_j(\bar{x}_n)|x_{j+1}| + \rho_j(\bar{x}_j)) + \right. \\ &\left. \left| \frac{\partial \alpha_{n-1}}{\partial k_j} \right| w_j(\cdot) \right] \end{aligned}$$

是通过推理可以得到的非线性函数, 即形式已知; $\theta_n = \max\{1, b_0, b_1, \dots, b_n, M_1, \dots, M_n\}$ 是未知常量.

需要特别注意的是, 当 $i = n$ 时, 不再存在误差变量 $z_{n+1} = x_{n+1} - \alpha_i$, 而此时的虚拟控制变量 α_i 即为系统的实际输入 u , 即

$$u = \mathcal{N}(k_n)\beta_n(\cdot)\text{sig}_{\lambda_n}(z_n)/\sigma_n(\mathbf{x}), \quad (33)$$

其中 $\beta_n(\cdot)$ 满足如下连续可微函数:

$$\beta_n(\cdot) \geq 1 + \beta'_n(x_1, x_2, \dots, x_n, y_r, k_1, k_2, \dots, k_{n-1}). \quad (34)$$

引入的第 n 个 Nussbaum 函数参变量 k_n 的自适应律设计为

$$\dot{k}_n = \begin{cases} \gamma_n \beta_n(x_1, \dots, x_n, y_r, k_1, \dots, k_{n-1})(|z_n| - \lambda_n), \\ |z_n| \geq \lambda_n; \\ 0, & |z_n| < \lambda_n. \end{cases} \quad (35)$$

由于第 n 步 $z_{n+1} = 0$, 通过演绎得出 Lyapunov 能量函数变化率 \dot{V}_n 最终可满足

$$\dot{V}_n(z_n) \leq \gamma_n^{-1}(\mathcal{N}_n^*(k_n) + \theta_n)\dot{k}_n. \quad (36)$$

2.2 稳定性分析

定理 1 对于式 (1) 所示的不确定非线性系统, 满足假设 1~假设 3. 通过适当调整设计参数, 利用本文提出的鲁棒 λ 调节技术所设计的控制律 (9)、控制律 (21) 和所引入 Nussbaum 函数包含的内部参数自适应律 (11) 和 (23), 能够使闭环控制系统中所有信号实现一致最终有界, 同时输出误差变量在给定的镇定边界 $[-\lambda_1, \lambda_1]$ 中达到最终收敛.

证明 不同于传统 Backstepping 方法, 这部分采用反证法分析上述结论. 首先假设函数 $k_n(t)$ 为无界函数, 即 $\lim_{t \rightarrow \infty} k_n(t) = +\infty$. 由式 (35) 给出的参数 k_n 的自适应律 $\dot{k}_n \geq 0$ 恒成立, 可得出函数 $k_n(t)$ 为单调递增函数. 设初始值 $k_n(t_0) = 1$, 对式 (36) 两边进行积分, 可得

$$\begin{aligned} V_n(z_n(t)) - V_n(z_n(0)) &\leq \\ \int_{t_0}^t \gamma_n^{-1}(\mathcal{N}_n^*(k_n) + \theta_n)\dot{k}_n dt &= \\ \gamma_n^{-1} \int_{k_n(0)}^{k_n(t)} \mathcal{N}_n^*(k) dk + \gamma_n^{-1} \theta_n &(k_n(t) - k_n(0)). \end{aligned} \quad (37)$$

式 (37) 两边同时除以 $k_n(t)$, 可得

$$\begin{aligned} 0 \leq \frac{V_n(z_n(t))}{k_n(t)} &\leq \frac{V_n(z_n(0))}{k_n(t)} + \gamma_n^{-1} \theta_n \left(1 - \frac{k_n(0)}{k_n(t)}\right) + \\ \frac{\gamma_n^{-1}}{k_n(t)} \int_{k_n(0)}^{k_n(t)} \mathcal{N}_n^*(k) dk. \end{aligned} \quad (38)$$

由假设可知, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, $k_n(t) \rightarrow +\infty$. 两边同时取下确界极限 ($\liminf(\cdot)$), 并且由 Nussbaum 函数特性可知, 式 (38) 右侧可能出现 $-\infty$, 与 Lyapunov 函数定义矛盾. 因此, 参数 $k_n(t)$ 一定是有界的. 同理可知, $V_n(z_n(t))$ 及误差变量 $z_n(t)$ 有界.

由于自适应律 (23) 中引入了死区, 且 $\beta_{n-1}(\cdot) \geq \sigma_{n-1}(\cdot)$, z_n 有界, 比如 $|z_n| \leq \varepsilon_n$, 对于第 $n-1$ 个子系统, 可以进行如下放缩:

$$\begin{aligned} M_{n-1}\sigma_{n-1}(\bar{x}_{n-1})|z_n| |\Delta V_{n-1}(z_{n-1})| &\leq \\ M_{n-1}\varepsilon_n \beta_{n-1}(\cdot) |\Delta V_{n-1}(z_{n-1})| &\leq \gamma_{n-1}^{-1} M_{n-1} \varepsilon_n \dot{k}_{n-1}. \end{aligned} \quad (39)$$

结合式 (39) 可以得到

$$\dot{V}_{n-1}(z_{n-1}) \leq \gamma_{n-1}^{-1}(\mathcal{N}_{n-1}^*(k_{n-1}) + \theta_{n-1} + M_{n-1}\varepsilon_n)\dot{k}_{n-1}. \quad (40)$$

同理可得, k_{n-1} 和 z_{n-1} 也是有界的. 以此类推, k_i 和 z_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 均是有界的. 由假设 2 可知, y_r 是有界的, $x_1 = z_1 + y_r$, 因此 x_1 也是有界的. 由此可知, 闭环系统中所有信号均是有界的. 由于 k_1 是单调递增且有界的, 有

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t \dot{k}_1(\tau) d\tau = k_1(\infty) - k_1(0) < \infty, \quad (41)$$

即 $\dot{k}_1(t)$ 是可积的. 由 Barbalat 定理, 可以得到

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{k}_1(t) = 0. \quad (42)$$

由式 (11) 和函数 $\beta_1(\cdot) \geq 1$ 可知, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, 跟踪误差变量 z_1 能够收敛于指定区间 $[-\lambda_1, \lambda_1]$ 内. \square

3 仿真研究

采用大连海事大学校实习船“育鲲”轮为仿真对象进行 Matlab 仿真研究. 操舵伺服系统考虑舵角幅值限制 $\delta_{\max} = 35^\circ$, 执行速率限制 $\dot{\delta}_{\max} = 3.0^\circ/\text{s}$ 验证本章提出的考虑暂态/稳态控制性能的鲁棒 λ 调节控制的有效性.

船舶航向保持控制系统数学模型^[1,11]如下:

$$\begin{cases} \dot{\psi} = r, \\ \dot{r} = -\frac{K_0}{T_0}(a_1 r + a_2 r^3) + \frac{K_0}{T_0}(\delta + \Delta(t)). \end{cases} \quad (43)$$

其中: $a_1 = 7.93$, $a_2 = 4100.46$, $K_0 = 0.31$, $T_0 = 62.0$ 均为模型参数. 利用本文提出的控制算法设计针对船舶航向保持控制任务的控制律和自适应律, 分别表示为

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= -\mathcal{N}(k_1)\beta_1(\cdot)\text{sig}_{\lambda_1}(z_1)/\delta_1(\cdot); \\ \delta &= -\mathcal{N}(k_2)\beta_2(\cdot)\text{sig}_{\lambda_2}(z_2)/\delta_2(\cdot); \end{aligned} \quad (44)$$

$$\begin{aligned} \dot{k}_1(t) &= \begin{cases} \gamma_1\beta_1(\cdot)(|z_1| - \lambda_1), & |z_1| \geq \lambda_1; \\ 0, & |z_1| < \lambda_1; \end{cases} \\ \dot{k}_2(t) &= \begin{cases} \gamma_2\beta_2(\cdot)(|z_2| - \lambda_2), & |z_2| \geq \lambda_2; \\ 0, & |z_2| < \lambda_2. \end{cases} \end{aligned} \quad (45)$$

其中: $z_1 = \psi - \psi_r$, $z_2 = r - \alpha_1$, $\delta_1(\cdot) = \delta_2(\cdot) = 1$, $\beta_1(\cdot) = 2$, $\beta_2(\cdot) = 2 + r^2(1 + r^2/4)$, Nussbaum 函数为 $\mathcal{N}: k \rightarrow k^2 \cos(k)$.

在仿真实验过程中, 船舶初始航向为 005° , 初始转首角速度为 $-0.1^\circ/\text{s}$, 参考航向命令为 030° . 因此, 初始航向偏差为 -25° . 该仿真实例分两组进行: 第 1 组仿真实验为 6 级海况下航向保持控制情况以验证该控制策略的鲁棒性能, 海洋环境干扰等效为 $\Delta(t) = 5 + 2 \sin(0.2t) + \cos(0.5t)$ 进行模拟^[9]; 第 2 组在第 1 组的干扰条件下, 人为改变系统控制增益函数符号为负 (即改变了控制方向) 后的航向保持控制情况.

针对以上实验方案, 控制器参数设置为 $k_1(0) = 0.01$, $k_2(0) = 0.2$, $\gamma_1 = 0.015$, $\gamma_2 = 0.007$, $\lambda_1 = 2^\circ$,

$\lambda_2 = 0.5^\circ/\text{s}$. 注意在第 2 组仿真实验中, 控制方向人为进行了改变.

受环境干扰时船舶保持航向控制结果如图 1(a) 所示, 虚线代表实际航向, 实线代表船舶参考航向; 航向跟踪误差如图 1(b) 所示.

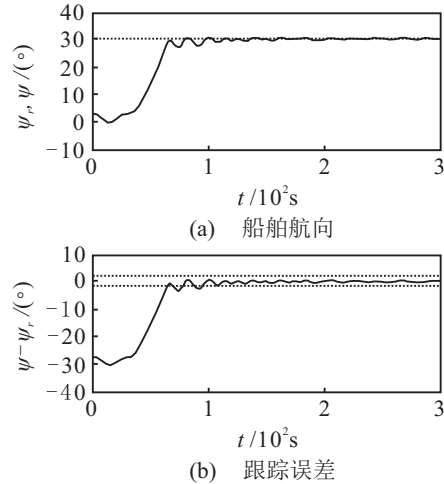


图 1 存在干扰情况下船舶航向和跟踪误差

从实验结果可以看出: 闭环控制系统受到外界环境干扰影响, 暂态响应过程基本没有变化, 但闭环控制系统进入稳定状态后, 船舶实际航向在参考航向上下不断地微小扰动, 控制精度较高. 考虑干扰时船舶控制舵角曲线如图 2 所示.

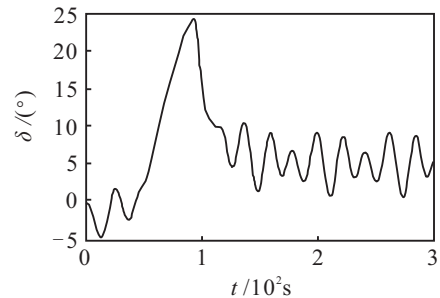


图 2 存在干扰时船舶控制舵角

系统进入稳定状态后, 控制舵角在较小的范围内上下抖动, 目的在于合理补偿外界环境干扰与船舶系统相互作用产生的干扰力/力矩, 为船舶控制工程实际所接受.

考虑干扰时未知增益系数 $k_1(t)$ 、 $k_2(t)$ 值的估计过程如图 3 所示. 第 2 组实验结果如图 4~图 6 所示.

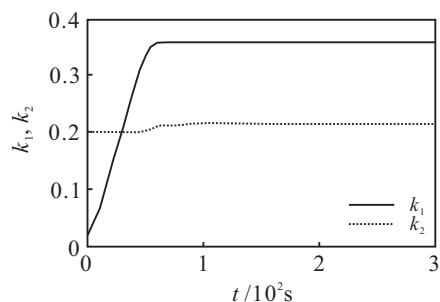


图 3 存在干扰时未知增益系数 $k_1(t)$ 、 $k_2(t)$ 在线学习

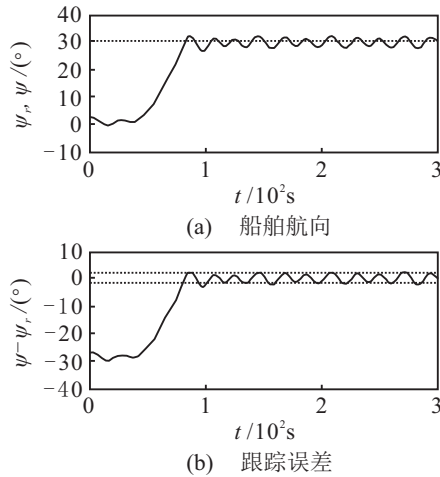


图4 存在干扰时改变控制方向后船舶航向及跟踪误差

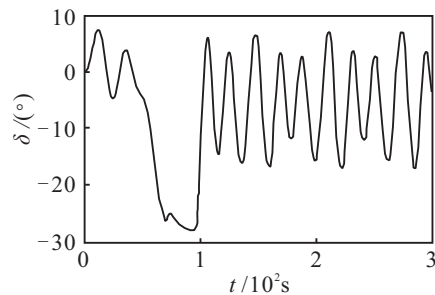


图5 存在干扰时改变控制方向后船舶控制舵角

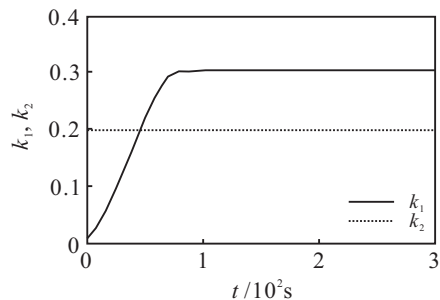


图6 存在干扰时改变控制方向后未知增益系数 $k_1(t)$, $k_2(t)$ 在线学习

从图4可以看出:对于人为改变控制方向后的被控对象,控制参数并不是有针对性地进行调整的.系统输出应能够顺利进入预设镇定边界中,但系统稳定后输出摄动动态明显,这可以通过调整控制参数进行抑制.图5中控制舵角大幅度调节的时间相比于图2更长,当达到稳态时基本反向.该现象是由人为改变控制增益方向导致的.

事实上,人为改变控制增益函数符号导致实际被控对象已经不是船舶航向系统.实验结果验证了本文提出的鲁棒 λ 调节控制策略的鲁棒性.整体而言,本文研究的考虑符号未知控制增益不确定的鲁棒 λ 调节技术是一种有效的、针对不确定非线性系统的鲁棒自适应控制策略,解决了Nussbaum增益技术处理控制增益未知问题时指定控制性能问题.

4 结论

本文提出了一种考虑符号未知控制增益函数不确定和系统漂移不确定条件的非线性鲁棒 λ 调节控

制策略.在该算法中,鲁棒项的构建能够同时处理漂移不确定和控制增益函数不确定(包含控制方向未知)问题,最终使整个闭环控制系统中所有信号满足一致最终有界.以船舶航向保持控制系统为例,仿真实验验证了提出的算法的可行性和有效性.

参考文献(References)

- [1] 张显库. 船舶运动简捷鲁棒控制[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 4-11.
(Zhang X K. Ship motion concise robust control[M]. Beijing: Science Press, 2012: 4-11.)
- [2] 郭晨, 汪洋, 孙富春, 等. 欠驱动水面船舶运动控制研究综述[J]. 控制与决策, 2009, 24(3): 321-327.
(Guo C, Wang Y, Sun F C, et al. Survey for motion control of underactuated surface vessels[J]. Control and Decision, 2009, 24(3): 321-327.)
- [3] Liu Z J, Wu Z L, Li Z. Latest development of IMO maritime safety conventions[J]. Navigation of China, 2012, 35(1): 61-65.
- [4] Kaloust J, Qu Z. Continuous robust control design for nonlinear uncertain systems without a priori knowledge of control direction[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1995, 40(2): 276-282.
- [5] Nussbaum R D. Some remarks on a conjecture in parameter adaptive control[J]. Systems & Control Letters, 1983, 3(5): 201-210.
- [6] Ye X D, Jiang Z P. Adaptive nonlinear design without a priori knowledge on control direction[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1998, 43(11): 1617-1621.
- [7] Ye X. Asymptotic regulation of time varying uncertain nonlinear systems with unknown control directions[J]. Automatica, 1999, 35(5): 929-935.
- [8] Peng J, Ye X. Cooperative control of multiple heterogeneous agents with unknown high frequency gain signs[J]. System and Control Letters, 2014, 68(6): 51-56.
- [9] Peng J, Ye X. Distributed adaptive controller for the output synchronization of networked systems in semistrict feedback form[J]. J of the Franklin Institute, 2014, 351(1): 412-428.
- [10] Chen J, Zhao H C, Liang Y. Unknown control direction hypersonic aircraft adaptive fault tolerant control[C]. The 24th Chinese Control and Decision Conf. Taiyuan: IEEE Press, 2012: 309-315.
- [11] Fossen T I. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control[M]. New York: Wiley, 2011: 48-55.
- [12] Li T S, Li Z F, Wang D, et al. Output-feedback adaptive neural control for stochastic nonlinear time varying delay systems with unknown control directions[J]. IEEE Trans on Neural Networks and Learning Systems, 2015, 26(6): 1188-1201.