

带有非线性输入和动态不确定性的神经网络控制

李红春, 王斌, 范丛山

(扬州工业职业技术学院电气信息工程学院, 江苏 扬州 225127)

摘要: 针对一类带有非线性输入和未建模动态的非仿射系统, 提出一种自适应控制器的设计方案。与现有结果相比, 此方案改进了对未建模动态的处理方法, 简化了设计过程, 提高了跟踪精度, 使得稳定性分析更加合理。李亚普诺夫方法分析证明该方案能够保证所有信号半全局一致终结有界。仿真结果验证了所提方案的有效性。

关键词: 动态信号; 死区; 动态面控制; 未建模动态

中图分类号: V271.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)10-0089-06

Neural Network Control with Input Nonlinearities and Dynamic Uncertainties

LI Hong-chun, WANG Bin, FAN Cong-shan

(School of Electrical and Information Engineering, Yangzhou Polytechnic Institute, Yangzhou 225127, China)

Abstract: A scheme for design of adaptive neural network controller is proposed for the class of non-affine systems with dead-zone nonlinear input and unmodeled dynamics. Compared with the existing methods, this scheme can improve the processing effect for unmodeled dynamics, simplify the design procedure and increase the tracking precision. Furthermore, it can make the stability analysis more reasonable. By theoretical analysis, the closed-loop systems is shown to be semi-globally uniformly ultimately bounded. Simulation results demonstrate the effectiveness of the proposed method.

Key words: dynamic signal; dead-zone; dynamic surface control; unmodeled dynamics

0 引言

近年来, 学者对死区输入和动态面控制的研究有了很多成果^[1-10]。其中, 文献[1-5]主要针对具有非线性死区输入的不同系统提出相应的解决方案, 将传统的后推设计与动态面控制^[6]相结合; 文献[7]对控制增益为1的非线性系统提出方案, 解决了对虚拟控制连续求导导致的复杂性问题; 文献[8-10]进一步将动态面方法推广到控制增益未知的非线性系统和纯反馈非线性系统; 随着研究系统的复杂, 具有未建模动态的系统成为近期热点, 文献[11-16]就对此类系统设计了相应的控制器, 其中, 文献[14]对一类带有未建模动态的纯反馈系统进行了研究, 但由于 Lyapunov 方程中引入动态信号使得稳定性分析不尽合理。

在文献[14]基础上, 本文针对一类非仿射非线性系统, 在存在死区输入和未建模动态的情况下, 研究了其自适应神经网络控制问题。与现有文献相比, 主要创新点为: 1) Lyapunov 方程中无需引入 v/λ_0 项, 从而避免在后推过程中出现 $(1 - \frac{s_1^2}{e_1^2}) \frac{\bar{Y}(|x_1|)}{\lambda_0}$ 项, 并免除了最后稳定性分析时要分情况进行讨论才可得到结论; 2) 改进了 $\alpha_0 = \min\{\gamma_\theta \sigma_\theta, \bar{c}\}$, \bar{c} 的存在限制了 α_0 , 使得它很难取到足够大的值, 改进后的 α_0 摆脱了 \bar{c} 的约束; 3) 在证得状态 x_1 有界后, 巧妙利用假设 5 和引理 1 推得动态信号和未建模动态信号有界。

1 模型描述和基本假设

考虑下面一类带有死区输入和未建模动态的非仿射非线性系统

$$\begin{cases} \dot{z} = q(z, X_n, t) \\ \dot{x}_i = h_i(X_i, x_{i+1}) + \Delta_i(z, X_n, t) & i = 1, \dots, n-1 \\ \dot{x}_n = h_n(X_n, D(t)) + \Delta_n(z, X_n, t) \\ y = x_1 \end{cases} \quad (1)$$

收稿日期: 2014-11-17

修回日期: 2015-08-13

基金项目: 国家自然科学基金(61175111); 江苏省高校“青蓝工程”(苏教师[2012]39号)

作者简介: 李红春(1981—), 女, 山东青岛人, 硕士生, 讲师, 研究方向为神经网络控制。

$$D(t) = \begin{cases} d_r(u(t)) & u(t) \geq d_+ \\ 0 & -d_- < u(t) < d_+ \\ d_l(u(t)) & u(t) \leq -d_- \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{X}_i = (x_1, \dots, x_i)^\top, i = 1, \dots, n$, 为可量测状态向量; y 为输出; $h_i(\mathbf{X}_i, x_{i+1})$ 为未知光滑函数; $D(t)$ 为非线性死区模型输入 $u(t)$ 的输出; $z \in \mathbf{R}^{n_0}$ 为不可测状态部分, 又称未建模动态或动态不确定项; $\Delta_i(z, \mathbf{X}_n, t)$ 为动态扰动, $\Delta_i(z, \mathbf{X}_n, t)$ 和 $q(z, \mathbf{X}_n, t)$ 为不确定项且满足 Lipschitz 条件的连续函数; d_+, d_- 为未知正常数; $d_r(u(t))$ 与 $d_l(u(t))$ 为光滑的未知连续函数。

假设 1^[2] 存在未知的正常数 $k_{l0}, k_{l1}, k_{r0}, k_{r1}$, 使得 $\forall u(t) \in [d_+, +\infty], 0 < k_{r0} \leq d'_r(v(t)) \leq k_{r1}; \forall u(t) \in (-\infty, -d_-], 0 < k_{l0} \leq d'_l(v(t)) \leq k_{l1}$ 并且 $0 < \rho \leq \min\{k_{l0}, k_{r0}\}$ 已知。

利用假设 1, 类似文献[2]中的讨论方法, 死区模型式(2)可改写为

$$D(t) = H(u)u(t) + d(u(t)) \quad (3)$$

$$\text{式中: } H(u) = \begin{cases} d'_r(u(t)) & u > 0 \\ d'_l(u(t)) & u \leq 0 \end{cases}, d(u(t)) =$$

$$\begin{cases} -d'_l(u(t))d_+ & u(t) \geq d_+ \\ -H(u)u & -d_- < u(t) < d_+ \text{ 且 } \min\{k_{r0}, k_{l0}\} \leq \\ d'_l(u(t))d_- & u(t) \leq -d_- \end{cases}$$

$H(u) \leq \min\{k_{r1}, k_{l1}\}, |d(u)| \leq d^*, d^* = \max(k_{r1}, k_{l1}) \cdot \max\{d_+, d_-\}$ 为未知的正常数。

控制目标: 对式(1)系统设计一个自适应控制器 $u(t)$, 使得系统输出 y 跟踪一个指定的参考轨迹 y_d , 并且闭环系统一致终结有界。

为了设计控制器, 做如下假设。

假设 2^[14] $h_i(\mathbf{X}_i, x_{i+1}), i = 1, 2, \dots, n$ 为未知光滑函数, 即它们可导且偏导数连续, 定义 $g_i(\mathbf{X}_i, x_{i+1}) = \frac{\partial h_i(\mathbf{X}_i, x_{i+1})}{\partial x_{i+1}}$, 其中 $x_{n+1} = D(t)$ 。根据中值定理知, 存在 $\lambda_i (0 \leq \lambda_i \leq 1)$ 使得

$$h_i(\mathbf{X}_i, x_{i+1}) = h_i(\mathbf{X}_i, 0) + g_i(\mathbf{X}_i, \lambda_i x_{i+1})x_{i+1} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

假设 3 存在正常数 g_m 和 g_M , 使得 $g_m < g_i(\cdot) \leq g_M$ 。

假设 4^[7] 期望输入 $y_d(t)$ 是关于 t 的光滑函数, 且 $(y_d, \dot{y}_d, \ddot{y}_d)^\top \in \Omega_d, \Omega_d = \{(y_d, \dot{y}_d, \ddot{y}_d) : \dot{y}_d^2 + \ddot{y}_d^2 + \ddot{y}_d^2 \leq D_0\}, D_0$ 为已知正常数。

假设 5^[13] 未知非线性动态扰动 $\Delta_i(z, \mathbf{X}_n, t)$ 满足 $|\Delta_i(z, \mathbf{X}_n, t)| \leq \beta_{1i}(\|\mathbf{X}_i\|) + \beta_{2i}(\|z\|), i = 1, \dots, n$, 其中 $\beta_{1i}(\cdot)$ 和 $\beta_{2i}(\cdot)$ 分别为未知非负的连续函数和单调递增连续函数, $\|\cdot\|$ 为欧氏范数。

假设 6^[13] 未建模动态的指数输入状态渐近稳

定, 即存在一个 Lyapunov 函数 $Q(z)$ 使系统 $\dot{z} = q(z, x)$ 满足

$$\alpha_1(\|z\|^2) \leq Q(z) \leq \alpha_2(\|z\|^2) \quad (5)$$

$$\frac{\partial Q(z)}{\partial t} q(z, x) \leq -cQ(z) + \gamma(|x_1|) + d \quad (6)$$

式中: $\alpha_1(\cdot), \alpha_2(\cdot)$ 为 k_∞ 函数; c, d 均为已知正常数; $\gamma(\cdot)$ 为 k_∞ 函数且为一个已知函数。

引理 1^[13] 若 W 是系统 $\dot{z} = q(z, x)$ 的指数输入状态渐近稳定函数, 即式(5)和式(6)成立, 则对任意的初始时间 $t_0 > 0$ 和初始状态 $z_0 = z(t_0), v_0 > 0$, 存在有限时间 $T_0 = \frac{Q(z_0)}{v_0} e^{c t_0} / c \geq 0$ 。对于非负函数 $D(t_0, t)$, 定义

动态信号 $\dot{v} = -cv + \gamma(|x_1|) + d, v(t_0) = v_0$, 当 $t \geq t_0 + T_0$ 时, 有 $D(t_0, t) = 0$, 使得 $Q(z) \leq v(t) + D(t_0, t)$ 。

引理 2^[15] 对于任意实值连续函数 $f(x, y), x \in \mathbf{R}^m, y \in \mathbf{R}^n$, 存在光滑的纯量函数 $\phi(x) \geq 0$ 和 $\psi(y) \geq 0$ 使得 $|f(x, y)| \leq \phi(x) + \psi(y)$ 成立。

本文选用径向基函数(RBF)神经网络逼近未知光滑函数。令 $\Omega_{\bar{z}_i} \subset \mathbf{R}^{i+3}$ 是一个紧集, $\gamma_i^\top \varphi_i(\bar{\mathbf{Z}}_i)$ 是在 $\Omega_{\bar{z}_i}$ 上对 $f_i(\bar{\mathbf{Z}}_i)$ 的 RBF 神经网络的逼近, 则有

$$f_i(\bar{\mathbf{Z}}_i) = \gamma_i^\top \varphi_i(\bar{\mathbf{Z}}_i) + \omega_i(\bar{\mathbf{Z}}_i) \quad (7)$$

式中: $\bar{\mathbf{Z}}_i = (\mathbf{X}_i, e_i, v, \dot{z}_i)^\top; \omega_i(\bar{\mathbf{Z}}_i)$ 是逼近误差; 基函数向量 $\varphi_i(\bar{\mathbf{Z}}_i) = (\xi_{i1}(\bar{\mathbf{Z}}_i), \dots, \xi_{il_i}(\bar{\mathbf{Z}}_i))^\top \in \mathbf{R}^{l_i}$, 此处 $\xi_{ij}(\bar{\mathbf{Z}}_i)$ 选用高斯函数, 即 $\xi_{ij}(\bar{\mathbf{Z}}_i) = \exp[-(\bar{\mathbf{Z}}_i - \bar{\omega}_{ij})^\top (\bar{\mathbf{Z}}_i - \bar{\omega}_{ij}) / \xi_{ij}^2], j = 1, \dots, l_i, i = 1, \dots, n, \bar{\omega}_{ij} = (\bar{\omega}_{ij1}, \dots, \bar{\omega}_{ijl_i})^\top$ 为基函数中心, $q_{ij} = i + 2, \xi_{ij}$ 为高斯函数的宽度。

为了便于设计的表述, 定义如下符号: $\bar{e}_i = (e_1, \dots, e_i)^\top, \bar{y}_j = (y_2, \dots, y_j)^\top, \theta = \max\{\|\gamma_i\|^2, 1 \leq i \leq n\}, \hat{\theta}$ 为 t 时刻对 θ 的估计值, $\tilde{\theta} = \hat{\theta} - \theta, y_j = z_j - u_j, j = 2, \dots, n_0$ 。定义 n 个动态面: $e_i = x_i - z_i, i = 1, \dots, n$, 其中 $z_1 = y_d$ 。

2 控制器的设计

此部分前 $n-1$ 步确定 $n-1$ 个虚拟控制, 在此基础上第 n 步确定控制律。

2.1 Step $i (1 \leq i \leq n-1)$

由第 1 个动态面及式(4)可得

$$\dot{e}_i = h_i(\mathbf{X}_i, 0) + g_i(\mathbf{X}_i, \lambda_i x_{i+1})x_{i+1} + \Delta_i(z, \mathbf{X}_n, t) - \dot{z}_i \quad (8)$$

由假设 5 易得

$$e_i \Delta_i(z, \mathbf{X}_n, t) \leq |e_i| \beta_{1i}(\|\mathbf{X}_i\|) + |e_i| \beta_{2i}(\|z\|) \quad (9)$$

再利用 Young's 不等式有

$$|e_i| \beta_{1i}(\|\mathbf{X}_i\|) \leq \frac{1}{\delta_i^2} e_i^2 \beta_{1i}^2(\|\mathbf{X}_i\|) + \frac{\delta_i^2}{4} \quad (10)$$

式中, δ_i 是一个正常数。因为 $\alpha_1(\cdot)$ 是 k_∞ 类函数, $\alpha_1^{-1}(\cdot)$ 是单调增函数, 利用式(5)和引理 1 可得

$$\|z\| \leq \alpha_1^{-1}(v(t) + D(t_0, t)) \quad (11)$$

依据假设 6, 存在 $p_i^* > 0$, 使得

$$\beta_{i2}(\|z\|) \leq p_i^* \beta_{i2} \circ \alpha_1^{-1}(v(t) + D(t_0, t)) \quad (12)$$

式中, $\beta_{i2} \circ \alpha_1^{-1}(\cdot) = \beta_{i2}(\alpha_1^{-1}(\cdot))$ 。因为 $\beta_{i2} \circ \alpha_1^{-1}(\cdot)$ 为非负的光滑函数, 利用引理 2 和式(12)可得

$$|e_i| \beta_{i2}(\|z\|) \leq p_i^* |e_i| \phi_i(v(t)) + p_i^* |e_i| \psi_i(D(t_0, t)) \quad (13)$$

式中, $\phi_i(\cdot)$ 和 $\psi_i(\cdot)$ 为未知的非负光滑函数, 类似式(10)得

$$p_i^* |e_i| \phi_i(v(t)) \leq e_i^2 \phi_i^2(v(t)) + \frac{p_i^{*2}}{4} \quad (14)$$

由引理 1 可知, 当 $t \geq t_0 + T_0$ 时, $D(t_0, t) = 0$ 。因为 $D(t_0, t)$ 和 $\psi_i(\cdot)$ 为有界光滑函数, 可设 $\psi_i^2(D(t_0, t)) \leq \psi_i^*$, 令 $f_i(\bar{Z}_i) = h_i(X_i, 0) + \frac{1}{\delta_i^2} e_i \beta_{i1}^2(|X_i|) + e_i \phi_i^2(v(t)) - \dot{z}_i$, 综

合式(10)、式(13)和式(14)得 $e_i \dot{e}_i \leq e_i f_i(\bar{Z}_i) + e_i g_i(X_i, \lambda_i x_{i+1}) x_{i+1} + \frac{1}{4} p_i^{*2} + \frac{1}{4} \delta_i^2 + \frac{1}{4} p_i^{*2} \psi_i^* + e_i^2$ 。令存在非负连续函数 $\bar{\omega}_i(\bar{e}_i, \bar{y}_i, \hat{\theta}, v, y_d, \dot{y}_d)$, 满足 $|\omega_i(\bar{Z}_i)| \leq \bar{\omega}_i(\bar{e}_i, \bar{y}_i, \hat{\theta}, v, y_d, \dot{y}_d)$, 用 RBF 神经网络逼近 $f_i(\bar{Z}_i)$, 并利用 Young's 不等式整理得

$$\begin{aligned} e_i \dot{e}_i &\leq \frac{g_m}{2\alpha_i^2} e_i^2 \gamma_i^2 \|\varphi_i\|^2 + \frac{\alpha_i^2}{2g_m} + e_i g_i(X_i, \lambda_i x_{i+1}) (e_{i+1} + \\ & y_{i+1} + u_{i+1}) + e_i \omega_i + \frac{1}{4} p_i^{*2} + \frac{1}{4} \delta_i^2 + \frac{1}{4} p_i^{*2} \psi_i^* + e_i^2 \leq \\ & \frac{g_m}{2\alpha_i^2} e_i^2 \theta \|\varphi_i\|^2 + 4e_i^2 + \frac{g_M^2}{4} e_{i+1}^2 + \frac{g_M^2}{4} y_{i+1}^2 + \\ & e_i g_i(X_i, \lambda_i x_{i+1}) u_{i+1} + \frac{\bar{\omega}_i^2}{4} + D_i \end{aligned} \quad (15)$$

式中: α_i 为正设计常数; $D_i = \frac{\alpha_i^2}{2g_m} + \frac{1}{4} p_i^{*2} + \frac{1}{4} \delta_i^2 + \frac{1}{4} p_i^{*2} \psi_i^*$ 。

选择虚拟控制为

$$u_{i+1} = -\frac{1}{2\alpha_i^2} \hat{\theta} \|\varphi_i\|^2 e_i - k_i e_i \quad (16)$$

式中, k_i 为正常数。以 u_{i+1} 为输入, 定义 1 阶滤波器为

$$\begin{cases} \tau_{i+1} \dot{z}_{i+1} + z_{i+1} = u_{i+1} \\ z_{i+1}(0) = u_{i+1}(0) \end{cases} \quad (17)$$

式中, τ_{i+1} 为滤波器时间常数。

将式(16)代入式(15), 进一步整理, 得

$$e_i \dot{e}_i \leq (-k_i g_m + 4) e_i^2 + \frac{g_M^2}{4} e_{i+1}^2 + \frac{g_M^2}{4} y_{i+1}^2 -$$

$$\frac{g_m}{2\alpha_i^2} \hat{\theta} \|\varphi_i\|^2 e_i^2 + \frac{\bar{\omega}_i^2}{4} + D_i \quad (18)$$

2.2 Step n

由第 n 个动态面及式(3)和式(4)得

$$\dot{e}_n = h_n(X_n, 0) + g_n(X_n, \lambda_n D(t)) [H(u)u(t) + d(u(t))] + \Delta_n(z, X_n, t) - \dot{z}_n \quad (19)$$

类似 Step i 可得, $e_n \dot{e}_n \leq e_n f_n(\bar{Z}_n) + e_n g_n(X_n, \lambda_n D(t)) \cdot [H(u)u(t) + d(u(t))] + \frac{1}{4} p_n^{*2} + \frac{1}{4} \delta_n^2 + \frac{1}{4} p_n^{*2} \psi_n^* + e_n^2$ 。其中, $f_n(\bar{Z}_n) = h_n(X_n, 0) + \frac{1}{\delta_n^2} e_n \rho_{n1}^2(|X_n|) + e_n \phi_n^2(v(t)) - \dot{z}_n$ 。

令存在非负连续函数 $\bar{\omega}_n(\bar{e}_n, \bar{y}_n, \hat{\theta}, v, y_d, \dot{y}_d)$, 满足

$$|\omega_n(\bar{Z}_n)| \leq \bar{\omega}_n(\bar{e}_n, \bar{y}_n, \hat{\theta}, v, y_d, \dot{y}_d)$$
, 类似地整理得

$$\begin{aligned} e_n \dot{e}_n &\leq \frac{g_m}{2\alpha_n^2} e_n^2 \theta \|\varphi_n\|^2 + g_n(X_n, \lambda_n D(t)) H(u) u e_n + \\ & 3e_n^2 + D_n + \frac{\bar{\omega}_n^2}{4} \end{aligned} \quad (20)$$

式中: α_n 为正设计常数; $D_n = \frac{\alpha_n^2}{2} + \frac{1}{4} p_n^{*2} + \frac{1}{4} \delta_n^2 + \frac{1}{4} p_n^{*2} \psi_n^* + \frac{g_M^2}{4} p^{*2}$ 。

设计控制律为

$$u(t) = -\frac{1}{\rho} (k_n e_n + \frac{1}{2\alpha_n^2} e_n \hat{\theta} \|\varphi_n\|^2) \quad (21)$$

式中, k_n 为正常数。因为 $H(u) \geq \rho$ 得 $e_n H(u) u \leq -k_n e_n^2 - \frac{1}{2\alpha_n^2} e_n^2 \hat{\theta} \|\varphi_n\|^2$ 。进一步整理, 得

$$e_n \dot{e}_n \leq (-k_n g_m + 3) e_n^2 - \frac{g_m}{2\alpha_n^2} e_n^2 \hat{\theta} \|\varphi_n\|^2 + \frac{\bar{\omega}_n^2}{4} + D_n \quad (22)$$

采用自适应律为

$$\dot{\hat{\theta}} = \gamma \left(\sum_{i=1}^n \frac{\|\varphi_i\|^2 e_i^2}{2\alpha_i^2} - \sigma \hat{\theta} \right) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (23)$$

式中, γ, σ 为正设计常数。

3 稳定性分析

由式(17)得 $\dot{z}_{i+1} = -\frac{y_{i+1}}{\tau_{i+1}}, i = 1, \dots, n-1$ 。 y_{i+1} 关于时间 t 的导数为

$$\begin{aligned} \dot{y}_{i+1} &= -\frac{y_{i+1}}{\tau_{i+1}} + [k_i \dot{e}_i + \frac{1}{2\alpha_i^2} \hat{\theta} \|\varphi_i\|^2 \dot{e}_i + \\ & \frac{1}{2\alpha_i^2} \dot{\hat{\theta}} \|\varphi_i\|^2 e_i + \frac{1}{2\alpha_i^2} \hat{\theta} e_i \frac{d\|\varphi_i\|^2}{dt}] \end{aligned} \quad (24)$$

存在非负连续函数 $\Phi_{i+1}(\bar{e}_i, \bar{y}_i, \hat{\theta}, v, y_d, \dot{y}_d, \ddot{y}_d)$ 使得

$$\left| \dot{y}_{i+1} + \frac{y_{i+1}}{\tau_{i+1}} \right| \leq \Phi_{i+1}(\bar{e}_i, \bar{y}_i, \hat{\theta}, v, y_d, \dot{y}_d, \ddot{y}_d) \quad (25)$$

由式(24)和式(25)得

$$y_{i+1} \dot{y}_{i+1} \leq -\frac{y_{i+1}^2}{\tau_{i+1}} + \Phi_{i+1} |y_{i+1}| \leq -\frac{y_{i+1}^2}{\tau_{i+1}} + y_{i+1}^2 + \frac{1}{4} B_{i+1}^2 \quad (26)$$

定义有界闭集 $\Omega_i = \{(\bar{e}_i, \bar{y}_i, v, \hat{\theta})^T : V_i \leq p\} \subset \mathbf{R}^p$ 。其中: $p_i = 2i + 1, i = 1, \dots, n; p$ 为正设计常数; $V_1 = e_1^2/2, V_i = \sum_{j=1}^i (e_j^2/2) + \sum_{j=2}^i (y_j^2/2), i = 2, \dots, n$ 。

假定 $M_{i+1}, i = 1, \dots, n-1$ 和 $N_i, i = 1, \dots, n$ 分别为连续函数 Φ_{i+1}, \bar{e}_i 对应在有界紧集 $\Omega_d \times \Omega_{i+1}, \Omega_d \times \Omega_i$ 上的最大值。

定理 1 对于式(1)非线性系统,在满足假设 1~6 条件下,设计式(21)控制律和式(23)自适应律,若初始条件满足 $V(0) \leq c, c > 0$ 为任意常数,则适当选择满足式(27)的设计常数,可使闭环系统实现半全局一致终结有界。

$$\begin{cases} k_i \geq g_m^{-1} (4 + \frac{g_M^2}{4} + \frac{\alpha_0}{2}) & i = 1, \dots, n \\ \frac{1}{\tau_{i+1}} = \frac{g_M^2}{4} + 1 + \frac{\alpha_0}{2} & i = 2, \dots, n, \alpha_0 = \min \{ \gamma \sigma \} \end{cases} \quad (27)$$

证明 考虑以下的 Lyapunov 函数

$$V(t) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n e_i^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n-1} y_{i+1}^2 + \frac{g_m \bar{\theta}^2}{2\gamma} \quad (28)$$

式(28)对 t 微分,将式(18),(22),(23),(26)代入整理得

$$\dot{V}(t) \leq \sum_{i=1}^n [(-k_i g_m + 4) + \frac{g_M^2}{4}] e_i^2 + \sum_{i=1}^{n-1} [(-\frac{1}{\tau_{i+1}} + 1 + \frac{g_M^2}{4}) y_{i+1}^2 + \frac{1}{4} \Phi_{i+1}^2] + g_m \gamma \tilde{\theta} \hat{\theta} + \sum_{i=1}^n (D_i + \frac{\bar{\omega}_i^2}{4}) \quad (29)$$

据完全平方公式得

$$-\sigma g_m \tilde{\theta} \hat{\theta} = -\sigma g_m \tilde{\theta} (\tilde{\theta} + \theta) \leq \sigma g_m [-\tilde{\theta}^2/2 + \theta^2/2] \quad (30)$$

令

$$\mu = \sum_{i=1}^n (D_i + \frac{N_i^2}{4}) + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{M_{i+1}^2}{4} + \sigma g_m \frac{\theta^2}{2} \quad (31)$$

可将式(27),(30),(31)代入式(29)得

$$\dot{V}(t) \leq -\alpha_0 V(t) + \mu \quad (32)$$

当 $V = p, \alpha_0 > \mu/p$, 则 $\dot{V} \leq 0$, 由此可知当初始条件 $V(0) \leq p$ 时, $V(t) \leq p, \forall t \geq 0$ 。由式(32)易得

$$0 \leq V(t) \leq \frac{\mu}{\alpha_0} + [V(0) - \frac{\mu}{\alpha_0}] e^{-\alpha_0 t} \quad (33)$$

因此,闭环信号 $e_i, \hat{\theta}, y_{i+1}$ 一致终结有界,进一步可得 x_i, u_{i+1}, z_{i+1} 一致终结有界。由于状态 x_1 有界,且 $\gamma(\cdot)$

是一个非负 k_∞ 类函数,故由引理 1 可知存在正常数 $\bar{\gamma}$, 使得 $\gamma(x_1) \leq \bar{\gamma}$, 所以 $\dot{v} \leq -cv + \bar{\gamma} + d$ 。在 $[t_0, t]$ 上积分得 $v \leq \frac{\bar{\gamma} + d}{c} + [v(t_0) - \frac{\bar{\gamma} + d}{c}] e^{-c(t-t_0)}$, 即得 v 有界, 当 $t \geq t_0 + T_0$ 时, 因为 $Q(z) \leq v(t) + D(t_0, t)$ 故得 $Q(z)$ 有界, 再由 $\alpha_1(\|z\|^2) \leq Q(z) \leq \alpha_2(\|z\|^2)$, 可得 $\|z\| \leq \alpha_1^{-1}(Q(z))$, 即得 z 有界。证毕。

4 计算机仿真结果

对如下带有死区输入和未建模动态的三阶非仿射系统进行仿真

$$\begin{cases} \dot{z} = -z + 0.125x_1x_2x_3 \sin t \\ \dot{x}_1 = x_1 + x_2 + \frac{x_2^3}{5} + 0.1z \sin(x_1x_2x_3t) \\ \dot{x}_2 = x_3 + \frac{x_3^3}{2} + 0.1z^2 \cos(x_2x_3t) \\ \dot{x}_3 = x_1x_2x_3 + (1 + 0.1 \sin(0.5x_1x_2x_3))D + \frac{3}{7}D^3 + 0.2z \cos(0.5x_2t) \\ y = x_1 \end{cases} \quad (34)$$

$$D(t) = \begin{cases} (1 - 0.3 \sin u)(u - 2.5) & u \geq 2.5 \\ 0 & -1.5 < u(t) < 2.5 \\ (0.8 - 0.2 \cos u)(u + 1.5) & u(t) \leq -1.5 \end{cases} \quad (35)$$

控制目标,使得系统输出 $y = x_1$ 跟踪参考轨迹 $y_d = 0.5(\sin t + \cos t)$ 。系统的初始状态取 $z(0) = 0.5, X_3(0) = (0, 0, 0)^T, \hat{\theta}(0) = 0.5, z_2(0) = z_3(0) = 0.1, v(0) = 0.1, \rho = 0.5, k_1 = 10, k_2 = 15, k_3 = 10, \gamma = 25, \sigma = 0.01; \tau_2 = \tau_3 = 0.001$ 。动态信号定义为: $\dot{v} = -0.6v + 2.5x_1^4 = 0.625$ 。仿真结果如图 1~图 3 所示。从图 1~图 2 可以看出,系统中存在死区,使得控制律有一定的震荡,但仍可以较好地控制系统输出跟踪指定的参考轨迹。

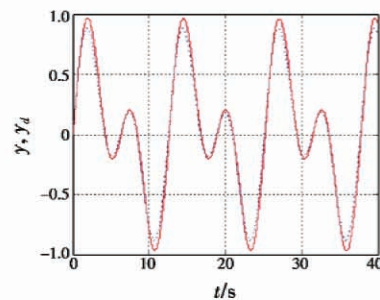
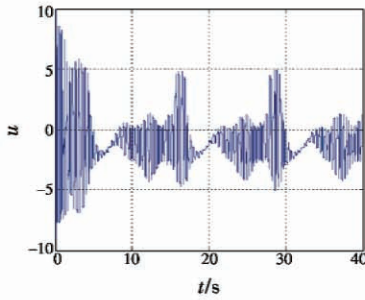
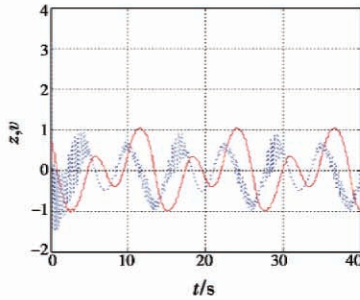


图 1 输出 y (实线)跟踪期望轨迹 y_d (虚线)
Fig. 1 Output y (solid line) tracking desired trajectory y_d (dash line)

图 2 控制信号 u Fig. 2 Control signal u 图 3 动态信号 v (实线)和未建模动态 z (虚线)Fig. 3 Dynamic signal v (solid line) and unmodeled dynamic z (dash line)

5 结论

本文研究了一类带有死区输入和未建模动态的非仿射系统的自适应控制问题。通过估算权向量模值,使系统仅需一个自适应参数,降低了复杂性。利用修正的 Lyapunov 方程,无需再分情况对稳定性分析进行讨论,使证明简炼。最终理论证得闭环系统所有信号半全局一致终结有界,通过仿真结果验证了所提控制方案的有效性。

参考文献

[1] ZHANG T P, GE S S. Adaptive surface control of nonlinear systems with unknown dead zone in pure feedback form[J]. Automatica, 2008, 44(7):1895-1903.

[2] ZHANG T P, ZHU Q, YANG Y Q. Adaptive neural control of non-affine pure-feedback non-linear systems with input nonlinearity and perturbed uncertainties[J]. International Journal of Systems Science, 2012, 43(4):691-706.

[3] 葛维维,张天平. 带有未知死区的机器人积分变结构模糊控制[J]. 电光与控制, 2011, 18(6):31-36. (GE W W, ZHANG T P. Integral variable structure fuzzy control of robot manipulators with unknown dead-zone[J]. Electronics Optics & Control, 2011, 18(6):31-36.)

[4] 钱厚斌,张天平. 控制增益符号已知的 MIMO 非线性时滞系统自适应控制[J]. 电光与控制, 2009, 16(8):

9-14, 39. (QIAN H B, ZHANG T P. Adaptive control of MIMO nonlinear time delay systems with known control gain signs [J]. Electronics Optics & Control, 2009, 16(8):9-14, 39.)

[5] 李红春,钱厚斌,杨月全. 具有未建模动态和非线性输入系统的动态面控制[J]. 扬州大学学报:自然科学版, 2013, 16(4):51-54, 63. (LI H C, QIAN H B, YANG Y Q. Adaptive dynamic surface control of nonlinear system with unmodeled dynamics and nonlinear input[J]. Journal of Yangzhou University: Natural Science Edition, 2013, 16(4):51-54, 63.)

[6] SWAROOP D, HEDRICK J K, YIP P P, et al. Dynamic surface control for a class of nonlinear systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2000, 45(10):1893-1899.

[7] WANG D, HUANG J. Neural network-based adaptive dynamic surface control for a class of uncertain nonlinear systems in strict-feedback form[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2005, 16(1):195-202.

[8] 邓涛,姚宏,杜军,等. 控制增益未知非线性系统的动态面控制[J]. 信息与控制, 2013, 42(6):686-692. (DENG T, YAO H, DU J, et al. Dynamic surface control for nonlinear systems with unknown control gains[J]. Information and Control, 2013, 42(6):686-692.)

[9] 刘勇华. 一类纯反馈非线性系统的动态面控制[J]. 控制理论与应用, 2014, 31(9):1262-1267. (LIU Y H. Dynamic surface control for pure-feedback nonlinear systems [J]. Control Theory and Applications, 2014, 31(9):1262-1267.)

[10] 刘树光,孙秀霞,董文瀚,等. 一类纯反馈非线性系统的简化自适应神经网络动态面控制[J]. 控制与决策, 2012, 27(2):266-270. (LIU S G, SUN X X, DONG W H, et al. Simplified adaptive neural dynamic surface control for a class of nonlinear systems in pure feedback form[J]. Control and Decision, 2012, 27(2):266-270.)

[11] WANG T, TONG S C. Adaptive fuzzy robust control for nonlinear system with dynamic uncertainties based on backstepping [C]//Innovative Computing Information and Control, the 3rd International Conference, Jinzhou, China, 2008:125-129.

[12] 季海波,陈作贤. 具有动态不确定的非线性系统的鲁棒自适应输出调节[J]. 中国科学技术大学学报, 2008, 38(7):835-840. (JI H B, CHEN Z X. Robust adaptive output regulation for nonlinear systems with dynamic uncertainties[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2008, 38(7):835-840.)

- [13] JIANG Z P, LAURENT P. Design of robust adaptive controllers for nonlinear systems with dynamic uncertainty [J]. *Automatica*, 1998, 34(7):825-840.
- [14] 张天平,高志远. 具有动态不确定性的自适应动态面控制[J]. *控制与决策*, 2013, 28(10):1541-1546, 1553. (ZHANG T P, GAO Z Y. Adaptive dynamic surface control including dynamic uncertainties[J]. *Control and Decision*, 2013, 28(10):1541-1546, 1553.)
- [15] LIN W, QIAN C J. Adaptive control of nonlinearly parameterized systems; a non-smooth feedback framework [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2002, 47(5):757-774.
- [16] 夏晓南,张天平. 具有未建模动态系统的自适应动态面输出反馈控制[J]. *控制与决策*, 2014, 29(12):2129-2136. (XIA X N, ZHANG T P. Adaptive dynamic surface output feedback control for systems with unmodeled dynamics [J]. *Control and Decision*, 2014, 29(12):2129-2136.)

(上接第 67 页)

- [5] 周旭宜,刘满仓. 国外激光制导武器现状与发展分析[J]. *飞航导弹*, 2013(11):25-29. (ZHOU X Y, LIU M C. Analysis of foreign laser guided weapons development [J]. *Aerodynamic Missile Journal*, 2013(11):25-29.)
- [6] 夏新仁,冯金平. 激光制导武器的现在与将来[J]. *中国航天*, 2009(12):22-26. (XIA X R, FENG J P. Development of laser-guided weapons [J]. *Aerospace China*, 2009(12):22-26.)
- [7] 张翼飞,邓方林. 激光制导技术的应用及发展趋势[J]. *中国航天*, 2004(6):41-44. (ZHANG Y F, DENG F L. The status and future development of laser-guided weapons [J]. *Aerospace China*, 2004(6):41-44.)
- [8] 白毅,仲海东,秦雅娟,等. 国外制导炮弹发展综述[J]. *飞航导弹*, 2013(5):33-38. (BAI Y, ZHONG H D, QIN Y J, et al. Foreign guided projectile development review [J]. *Aerodynamic Missile Journal*, 2013(5):33-38.)
- [9] 王狂飙. 激光制导武器的现状、关键技术与发展[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(5):651-655. (WANG K B. Status quo, key technology and development of laser guided weapon [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(5):651-655.)
- [10] 李建中,彭其先,李泽仁,等. 弹载激光主动成像制导技术发展现状分析[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(4):1117-1123. (LI J Z, PENG Q X, LI Z R, et al. Technology of missile-borne laser active imaging guidance [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(4):1117-1123.)
- [11] 刘勇. 对激光主动成像制导武器告警探测技术分析[J]. *舰船电子对抗*, 2009, 32(6):47-50. (LIU Y. Analysis of warning and detecting technology for active laser imaging guided weapon [J]. *Shipboard Electronic Countermeasure*, 2009, 32(6):47-50.)
- [12] 张英远. 激光对抗中的告警和欺骗干扰技术[D]. 西安:西安电子科技大学, 2012. (ZHANG Y Y. Warning and deception jamming technology of laser countermeasure [D]. Xi'an: Xidian University, 2012.)
- [13] 梁阔,冯源. 激光精确制导技术及其干扰技术分析[J]. *飞航导弹*, 2011(2):80-84. (LIANG K, FENG Y. Analysis of precision-guided laser technology and interference [J]. *Aerodynamic Missile Journal*, 2011(2):80-84.)
- [14] 沈涛,宋建社. 激光制导武器实时波门选通信号技术分析[J]. *弹箭与制导学报*, 2006(4):398-400. (SHEN T, SONG J S. Analysis of laser guidance weapon's real-time gate signal choosing technology [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2006(4):398-400.)
- [15] 许毅玢,徐军. CO₂ 激光成像雷达及其在制导技术中的应用[J]. *红外与激光工程*, 2008(s3):303-306. (XU Y F, XU J. CO₂ laser imaging radar and its application in guidance technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008(s3):303-306.)
- [16] 庄昕宇,陈兆兵. 半主动激光精确末制导武器的发展现状与趋势[J]. *舰船电子工程*, 2011(6):6-10. (ZHUANG X Y, CHEN Z B. Current status and its developing trend of semiactive laser guided weapon [J]. *Ship Electronic Engineering*, 2011(6):6-10.)

(上接第 88 页)

- [11] 李自勤,李琪,王骐. 由统计特性分析激光主动成像系统图像的噪声性质[J]. *中国激光*, 2004, 31(9):1081-1085. (LI Z Q, LI Q, WANG Q. Noise characteristic in active laser imaging system by statistic analysis [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, 31(9):1081-1085.)