

采用 RBF 网络的喷雾机喷杆 自适应动态面跟踪控制*

芦泽阳, 李树江, 王向东

(沈阳工业大学 信息科学与工程学院, 沈阳 110870)

摘要: 为了实现喷雾机喷杆快速而准确地伺服跟踪农作物冠层高度, 选用电液伺服系统作为其位置调节装置, 系统建模以喷雾机喷杆为负载的电液伺服系统. 首先, 充分考虑系统的强非线性和参数不确定因素, 建立完整的数学模型; 然后, 采用动态面方法设计控制器, 通过 RBF 网络对不确定项和非线性函数进行逼近, 在控制律中加入阻尼项补偿干扰对系统性能的影响; 基于 Lyapunov 稳定性方法, 证明闭环系统信号最终一致有界; 最后, 对某喷雾机喷杆系统进行仿真验证, 结果表明设计控制器具有良好的仿形跟踪控制性能.

关键词: 喷雾机喷杆; 电液伺服系统; 动态面控制; 仿形跟踪

中图分类号: TH273

文献标志码: A

DOI: 10.21656/1000-0887.390270

引 言

对于大型喷雾机, 一个重要的考虑因素是实现高精度喷射操作. 喷嘴和冠层距离影响喷雾质量, 距离过小或过大, 液滴都不能均匀喷洒在农作物上, 喷雾机在行进运动中喷杆会发生有害振动^[1]. 因此, 精准控制喷雾机喷杆位置对均匀喷洒农药具有重要意义.

喷雾机喷杆系统的位置调节多使用被动弹簧缓冲技术和 PID 控制策略^[2-6]. 文献[2]针对喷杆连接机构采用钢索、弹簧等柔性连接来减轻喷杆有害振动, 但未进行主动控制; 文献[6]设计基于超声波传感器的 PID 控制喷杆位姿系统, 当外部干扰作用于系统时, 控制器难以满足精度要求. 电液伺服系统具有控制精度高、负载能力强、响应速度快等特点, 已逐步被应用在大型智能喷雾机喷杆伺服跟踪领域, 但喷杆系统本身具有强非线性和参数不确定性, 严重影响系统的控制精度与效果.

目前, 为了提高电液伺服系统的控制精度与稳定性能, 国内外学者做了大量的研究, 并取得了一些研究成果^[7-17]. 文献[9]提出了基于反馈线性化技术的方法, 文献[10-11]将鲁棒自适应方法应用于电液伺服系统控制. 反步控制可以较好地处理非线性系统, 文献[12-15]提出了基于反步法的非对称液压缸控制方法, 取得了良好的控制效果, 文献[16]针对一类具有外部扰动的非线性系统, 基于反步法进行干扰补偿. 传统反步设计需要对虚拟控制量重复微分, 增加了算法复杂性. 而动态面算法对反步法中虚拟量进行一阶滤波, 简化了控制器设计.

* 收稿日期: 2018-10-17; 修订日期: 2019-05-10

基金项目: 国家“十三五”重点课题(2016YFD0700104)

作者简介: 芦泽阳(1993—), 男, 硕士生(通讯作者. E-mail: lzyluxiaoyang@163.com).

基于上述分析,本文针对以喷雾机喷杆为负载的电液伺服系统,提出了一种自适应动态面控制方法.考虑喷杆系统结构并建立完整数学模型,采用 RBF 网络逼近非线性函数,通过阻尼项补偿干扰对系统的影响,结合动态面方法,避免了传统反步的“膨胀”问题,简化控制器结构.最后将设计控制器应用到某喷雾机喷杆系统进行仿真,验证了所提方法的合理性与有效性.

1 电液伺服系统建模

电液伺服系统数学模型主要由液压缸运动学方程和流量方程组成,系统示意图如图 1 所示.

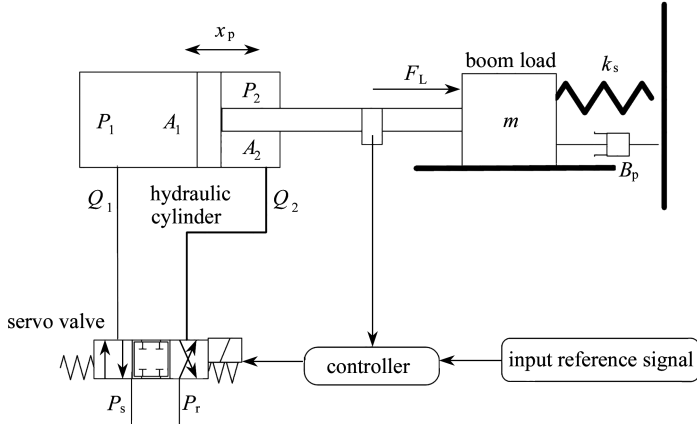


图 1 电液伺服系统

Fig. 1 The electro-hydraulic servo system

系统运动学方程为

$$P_1 A_1 - P_2 A_2 = m \ddot{x}_p - B_p \dot{x}_p - k_s x_p + F_L, \quad (1)$$

式中, P_1, P_2 为液压腔压力; A_1, A_2 为液压腔作用面积; x_p 为喷杆位移; m 为喷杆质量; B_p 为活塞摩擦因数; k_s 为弹性系数; F_L 为作用在活塞外负载力、摩擦力和难以建模的阻力等.

忽略外泄漏影响,系统流量方程为

$$\begin{cases} \dot{P}_1 = \frac{\beta_e}{V_1} (-A_1 \dot{x}_p + Q_1 - C_{tm}(P_1 - P_2)), \\ \dot{P}_2 = \frac{\beta_e}{V_2} (A_2 \dot{x}_p - Q_2 + C_{tm}(P_1 - P_2)), \end{cases} \quad (2)$$

式中, β_e 为弹性模量; C_{tm} 为内泄漏系数; $V_1 = V_{10} + A_1 x_p$, $V_2 = V_{20} - A_2 x_p$, V_{10} 和 V_{20} 为液压两腔初始容积; Q_1 为流入无杆腔流量, Q_2 为流出有杆腔流量.

流量 Q_1 和 Q_2 为

$$Q_i = k_q x_v \sqrt{\Delta P_i}, \quad i = 1, 2, \quad (3)$$

其中

$$\Delta P_1 = \begin{cases} P_s - P_1, & x_v \geq 0, \\ P_1 - P_r, & x_v < 0, \end{cases} \quad (4)$$

$$\Delta P_2 = \begin{cases} P_2 - P_r, & x_v \geq 0, \\ P_s - P_2, & x_v < 0, \end{cases} \quad (5)$$

$k_q = C_d w \sqrt{2/\rho}$, C_d 为阀口流量系数, w 为伺服阀开口梯度, ρ 为液压油密度; P_s 和 P_r 为供油压

力和回油压力; x_v 为阀芯位移, 与输入电压 u 之间近似为比例环节, 即 $x_v = k_v u$, 系数 $k_v > 0$. 选取状态变量 $\mathbf{x}^T = [x_1, x_2, x_3, x_4]^T = [x_p, \dot{x}_p, P_1, P_2]^T$, 转化为严格反馈形式, 定义新系统变量 $\bar{x}_3 = A_1 x_3 - A_2 x_4$, 可得

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = f_1(\mathbf{x}) + b_1 \bar{x}_3 + D_1, \\ \dot{\bar{x}}_3 = f_2(\mathbf{x}) + b_2 U + D_2, \end{cases} \quad (6)$$

式中

$$b_1 = \frac{1}{m}; b_2 = \beta_e k_q k_v; U = g(\mathbf{x}) u = \left(\frac{A_1}{V_1} \sqrt{\Delta P_1} + \frac{A_2}{V_2} \sqrt{\Delta P_2} \right) u;$$

$$f_1(\mathbf{x}) = \frac{1}{m} (-B_p x_2 - k_s x_1); f_2(\mathbf{x}) = -\beta_e \left(\frac{A_1^2}{V_1} + \frac{A_2^2}{V_2} \right) x_2 - \beta_e C_t \left(\frac{A_1}{V_1} + \frac{A_2}{V_2} \right) (x_3 - x_4);$$

$$D_1 = \Delta f_1(\mathbf{x}) + \Delta b_1 \bar{x}_3 + d; D_2 = \Delta f_2(\mathbf{x}) + \Delta b_2 g(\mathbf{x}) u;$$

D_1 和 D_2 为系统中的复合干扰; $\Delta f_i(\mathbf{x})$ 和 $\Delta b_i (i = 1, 2)$ 表示由参数摄动引起的不确定性; $d = -F_L/m$ 为外部扰动. 参数 $\beta_e, B_p, k_s, C_{tm}, C_d$ 和 ρ 具有不确定性, m 不能精确已知, 外负载力 F_L 是时变的. 仅考虑参数 m, β_e, C_d 和 F_L 存在不确定性.

2 基本假设

根据实际系统, 不失一般性, 考虑如下假设: 1) 参考输入信号 x_{1d}, \dot{x}_{1d} 和 \ddot{x}_{1d} 存在且有界; 2) $f_1(\mathbf{x})$ 和 $f_2(\mathbf{x})$ 为非线性光滑函数, 复合干扰 D_1 和 D_2 均有界; 3) 增益函数 $g(\mathbf{x})$ 的符号已知, 假设为正. 存在常数 $g_1, g_3 \geq 0$, 使得 $g_1 \leq g(\mathbf{x}) \leq g_3$ 成立.

引理 1^[17] 一个 n 输入单输出且中间层有 N 个神经元的 RBF 神经网络可以表示为 $y = \boldsymbol{\theta}^T \boldsymbol{\xi}(\mathbf{x})$, 其中 $\mathbf{x} \in R^n$ 是输入向量, $y \in R$ 是输出量, $\boldsymbol{\theta} \in R^N$ 是可调权值向量, $\boldsymbol{\xi}(\mathbf{x}) \in R^N$ 是非线性函数且 $\boldsymbol{\xi}(\mathbf{x}) = [\beta_1(\mathbf{x}), \beta_2(\mathbf{x}), \dots, \beta_N(\mathbf{x})]^T, \beta_i(\mathbf{x}), i = 1, 2, \dots, N$ 是 Gauss 基函数, 形如 $\beta_i(\mathbf{x}) = \exp(-\|\mathbf{x} - \mathbf{z}_i\|^2/2v^2)$, 其中, $\mathbf{z}_i \in R^n, i = 1, 2, \dots, N$ 为第 i 个 Gauss 基函数中心, $v > 0$ 为 Gauss 基函数宽度.

$$f(\mathbf{x}) = \boldsymbol{\theta}^{*T} \boldsymbol{\xi}(\mathbf{x}) + \sigma^*, \quad \mathbf{x} \in \Omega, \quad (7)$$

式中, σ^* 为误差且满足 $|\sigma^*| \leq \sigma_M; \boldsymbol{\theta}^*$ 有界且未知, 存在已知正数 θ_M 使 $\|\boldsymbol{\theta}^*\| \leq \theta_M$.

3 动态面控制器设计

3.1 控制器设计

采用动态面方法设计喷杆位置伺服控制器. 设计分为 3 步, 前 2 步分别设计虚拟控制量和自适应律, 最后一步设计实际控制律.

第 1 步 定义第一个误差面 $S_1 = x_1 - x_{1d}$, 求得

$$\dot{S}_1 = x_2 - \dot{x}_{1d}. \quad (8)$$

设计虚拟控制量

$$\bar{x}_2 = -c_1 S_1 + \dot{x}_{1d}, \quad (9)$$

其中, $c_1 > 0$ 为可控制参数.

取 x_{2d} 为 \bar{x}_2 低通滤波器 $1/(\tau_2 s + 1)$ 输出, 定义 $x_{2d} = -c_1 S_1 + \dot{x}_{1d}$, 满足

$$\begin{cases} \tau_2 \dot{x}_{2d} + x_{2d} = \bar{x}_2, \\ x_{2d}(0) = \bar{x}_2(0). \end{cases} \quad (10)$$

第2步 定义第二个误差面 $S_2 = x_2 - x_{2d}$, 求导得

$$\dot{S}_2 = b_1 \left(\dot{\bar{x}}_3 + \frac{1}{b_1} f_1(\mathbf{x}) + \frac{1}{b_1} (D_1 - \dot{x}_{2d}) \right). \quad (11)$$

构造 RBF 网络逼近非线性函数

$$\frac{1}{b_1} f_1(\mathbf{x}) = \boldsymbol{\theta}_1^{*T} \boldsymbol{\xi}_1(\mathbf{x}) + \sigma_1^*, \quad (12)$$

其中, σ_1^* 为逼近误差, $|\sigma_1^*| \leq \sigma_M$; $\boldsymbol{\theta}_1^*$ 为理想权值, $\|\boldsymbol{\theta}_1^*\| \leq \theta_M$.

定义向量

$$\boldsymbol{\theta}_1^T = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\theta}_1^{*T} & \frac{1}{b_1} \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\Psi}_1 = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\xi}_1(\mathbf{x}) \\ \frac{\delta_1^2 S_2}{2\varepsilon} - \dot{x}_{2d} + c_2 S_2 \end{bmatrix}, \quad (13)$$

其中, $c_2 > 0$ 为可调控制参数; ε 为正数; $(\delta_1^2 S_2)/(2\varepsilon)$ 为阻尼项, 用于补偿 D_1 .

设计虚拟控制量

$$\bar{x}_3 = -\hat{\boldsymbol{\theta}}_1^T \boldsymbol{\Psi}_1, \quad (14)$$

其中, $\hat{\boldsymbol{\theta}}_1$ 是 $\boldsymbol{\theta}_1$ 的估计值.

设计自适应律为

$$\dot{\hat{\boldsymbol{\theta}}}_1 = \boldsymbol{\Gamma}_1 \boldsymbol{\Psi}_1 S_2 - \boldsymbol{\Gamma}_1 \eta_1 \hat{\boldsymbol{\theta}}_1, \quad (15)$$

其中, $\boldsymbol{\Gamma}_1$ 为正定对称矩阵, η_1 为正实数.

取 x_{3d} 为 \bar{x}_3 低通滤波器 $1/(\tau_3 s + 1)$ 输出, 满足

$$\begin{cases} \tau_3 \dot{x}_{3d} + x_{3d} = \bar{x}_3, \\ x_{3d}(0) = \bar{x}_3(0). \end{cases} \quad (16)$$

第3步 定义第三个误差面 $S_3 = x_3 - x_{3d}$, 求导得

$$\dot{S}_3 = b_2 \left(U + \frac{1}{b_2} f_2(\mathbf{x}) + \frac{1}{b_2} (D_2 - \dot{x}_{3d}) \right). \quad (17)$$

构造 RBF 网络逼近非线性函数

$$\frac{1}{b_2} f_2(\mathbf{x}) = \boldsymbol{\theta}_2^{*T} \boldsymbol{\xi}_2(\mathbf{x}) + \sigma_2^*, \quad (18)$$

其中, σ_2^* 为逼近误差, $|\sigma_2^*| \leq \sigma_M$; $\boldsymbol{\theta}_2^*$ 为理想权值, $\|\boldsymbol{\theta}_2^*\| \leq \theta_M$.

定义向量

$$\boldsymbol{\theta}_2^T = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\theta}_2^{*T} & \frac{1}{b_2} \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\Psi}_2 = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\xi}_2(\mathbf{x}) \\ \frac{\delta_2^2 S_3}{2\varepsilon} - \dot{x}_{2d} + c_3 S_3 \end{bmatrix}, \quad (19)$$

其中, $c_3 > 0$ 为可调控制参数; ε 为正数; $(\delta_2^2 S_3)/(2\varepsilon)$ 为阻尼项, 用于补偿 D_2 .

设计实际控制量

$$U = -\hat{\boldsymbol{\theta}}_2^T \boldsymbol{\Psi}_2, \quad (20)$$

其中, $\hat{\boldsymbol{\theta}}_2$ 是权值 $\boldsymbol{\theta}_2$ 的估计.

自适应律为

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}_2 = \boldsymbol{\Gamma}_2 \boldsymbol{\Psi}_2 S_3 - \boldsymbol{\Gamma}_2 \eta_2 \hat{\boldsymbol{\theta}}_2, \quad (21)$$

其中, $\boldsymbol{\Gamma}_2$ 为正定对称矩阵, η_2 为正实数.

3.2 稳定性分析

定理 1 对于电液伺服闭环系统, 在满足假设 1) ~ 3) 的条件下和初始条件 $V(0) \leq \rho$ (ρ 为任意正常数), 采用动态面算法和基于稳定性理论分析可得: ① 闭环系统是稳定的; ② 喷杆系统位置跟踪误差 $S_1 = x_1 - x_{1d}$ 及各参数估计误差一致有界; ③ 当 t 充分大时, 跟踪误差收敛于 $Q/(2r)$.

证明 定义虚拟控制量误差为

$$y_i = x_{id} - \bar{x}_i, \quad i = 2, 3, \quad (22)$$

可得

$$\dot{x}_{id} = -\frac{y_i}{\tau_i}, \quad i = 2, 3. \quad (23)$$

定义 RBF 网络权值误差 $\tilde{\boldsymbol{\theta}}_i = \hat{\boldsymbol{\theta}}_i - \boldsymbol{\theta}_i^*$, $i = 1, 2$. 分别对各项误差面和虚拟控制量求导整理得

$$\dot{y}_2 = \dot{x}_{2d} - \dot{x}_2 = -\frac{y_2}{\tau_2} + c_1 \dot{S}_1 - \ddot{x}_{1d}, \quad (24)$$

$$\dot{y}_3 = \dot{x}_{3d} - \dot{x}_3 = -\frac{y_3}{\tau_3} + \hat{\boldsymbol{\theta}}_1^T \boldsymbol{\psi}_1 + \hat{\boldsymbol{\theta}}_1^T \dot{\boldsymbol{\psi}}_1. \quad (25)$$

存在非负上界连续函数 B_2, B_3 , 且有

$$\left| \dot{y}_2 + \frac{y_2}{\tau_2} \right| \leq B_2(S_1, S_2, y_2, \tilde{\boldsymbol{\theta}}_1, x_{1d}, \dot{x}_{1d}, \ddot{x}_{1d}), \quad (26)$$

$$\left| \dot{y}_3 + \frac{y_3}{\tau_3} \right| \leq B_3(S_1, S_2, S_3, y_2, y_3, \tilde{\boldsymbol{\theta}}_1, \tilde{\boldsymbol{\theta}}_2, x_{1d}, \dot{x}_{1d}, \ddot{x}_{1d}), \quad (27)$$

则

$$y_i y_i \leq -\frac{y_i^2}{\tau_i} + B_i |y_i|, \quad i = 2, 3. \quad (28)$$

选取整个系统的 Lyapunov 函数

$$V = V_1 + V_2 + V_3, \quad (29)$$

其中

$$\begin{cases} V_1 = \frac{1}{2}(S_1^2 + S_2^2 + S_3^2), \\ V_2 = \frac{1}{2}(y_2^2 + y_3^2), \\ V_3 = \frac{1}{2}(b_1 \tilde{\boldsymbol{\theta}}_1^T \boldsymbol{\Gamma}_1^{-1} \tilde{\boldsymbol{\theta}}_1 + b_2 \tilde{\boldsymbol{\theta}}_2^T \boldsymbol{\Gamma}_2^{-1} \tilde{\boldsymbol{\theta}}_2). \end{cases} \quad (30)$$

由 $(\delta_1^2 S_2^2)/(2\varepsilon) + \varepsilon/2 \geq |\delta_1| |S_2| \geq D_1 S_2$ 和 $(\delta_2^2 S_3^2)/(2\varepsilon) + \varepsilon/2 \geq |\delta_2| |S_3| \geq D_2 S_3$, 整理得

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & |S_1| |S_2| + |S_1| |y_2| + b_1 |S_2| |S_3| + b_2 |S_2| |y_3| - \sum_{i=1}^3 c_i S_i^2 + b_1 |S_2| |\sigma_1^*| + \\ & b_2 |S_3| |\sigma_2^*| + \varepsilon + \sum_{i=2}^3 \left(-\frac{y_i^2}{\tau_i} + |B_i| |y_i| \right) - b_1 \tilde{\boldsymbol{\theta}}_1^T \boldsymbol{\eta}_1 \hat{\boldsymbol{\theta}}_1 - b_2 \tilde{\boldsymbol{\theta}}_2^T \boldsymbol{\eta}_2 \hat{\boldsymbol{\theta}}_2. \end{aligned} \quad (31)$$

由 Young 不等式及 $2\tilde{\theta}^T \hat{\theta} \geq \|\tilde{\theta}\|^2 - \|\theta\|^2$, 整理得

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & (1 - c_1)S_1^2 + \left(\frac{1}{2} + \frac{3b_1}{2} - c_2\right)S_2^2 + \left(\frac{1}{2} + \frac{b_2}{2} - c_3\right)S_3^2 + \\ & \left(\frac{1}{2} + \frac{B_2^2}{2\varepsilon} - \frac{1}{\tau_2}\right)y_2^2 + \left(\frac{1}{2} + \frac{B_3^2}{2\varepsilon} - \frac{1}{\tau_3}\right)y_3^2 + 2\varepsilon + \\ & \frac{\eta_1 b_1}{2} \|\theta_1\|^2 + \frac{\eta_2 b_2}{2} \|\theta_2\|^2 + \frac{b_1}{2} \sigma_1^{*2} + \frac{b_2}{2} \sigma_2^{*2} - \\ & \frac{\eta_1 b_1}{2\lambda_{\max}(\Gamma_1^{-1})} \tilde{\theta}_1^T \Gamma_1^{-1} \tilde{\theta}_1 - \frac{\eta_2 b_2}{2\lambda_{\max}(\Gamma_2^{-1})} \tilde{\theta}_2^T \Gamma_2^{-1} \tilde{\theta}_2. \end{aligned} \quad (32)$$

控制参数选取如下:

$$\begin{aligned} c_1 \geq 1 + r, \quad c_2 \geq \frac{1}{2} + \frac{3b_{1M}}{2} + r, \quad c_3 \geq \frac{1}{2} + \frac{b_{2M}}{2} + r, \\ \frac{1}{\tau_2} \geq \frac{1}{2} + \frac{B_2^2}{2\varepsilon} + r, \quad \frac{1}{\tau_3} \geq \frac{1}{2} + \frac{B_3^2}{2\varepsilon} + r, \quad \eta_1 \geq 2r\lambda \max(\Gamma_1^{-1}), \quad \eta_2 \geq 2r\lambda \max(\Gamma_2^{-1}), \end{aligned}$$

r 为待设计正数.

考虑假设 1)~3) 及 $|\sigma_i^2| \leq \sigma_M$, $\|\theta_i^*\| \leq \theta_M, i = 1, 2$, 整理得

$$\dot{V} \leq 2rV + Q + \sum_{i=2}^3 \left(\frac{B_i^2}{M_i^2} - 1 \right) \frac{M_i^2 y_i^2}{2\varepsilon}, \quad (33)$$

其中

$$Q = 2\varepsilon + \left(\frac{b_{1M}}{2} + \frac{b_{2M}}{2} \right) \sigma_M^2 + \left(\frac{\eta_1 b_{1M}}{2} + \frac{\eta_2 b_{2M}}{2} \right) \theta_M^2. \quad (34)$$

当 $V \leq p$ 成立时, $B_i \leq M_i$ 成立; 当 $V = p$ 时, 即 $V \leq -2rp + Q \leq 0$, 故选取 $r \geq Q/(2p)$.

解不等式可得

$$V \leq \frac{Q}{2r} + \left(V(0) - \frac{Q}{2r} \right) e^{-2rt}. \quad (35)$$

因此, 喷杆闭环系统内所有信号均有界, 且当 t 充分大时, $V(t) \leq Q/(2r)$. 定理 1 得证.

4 仿 真

为验证设计控制器性能, 采用仿真软件对控制系统仿真. 伺服系统参数选择如下所示:

$$P_s = 9 \text{ MPa}, \quad P_r = 0 \text{ MPa}, \quad A_1 = 3.14 \times 10^{-4} \text{ m}^2, \quad A_2 = 2.355 \times 10^{-4} \text{ m}^2,$$

$$V_{10} = 8.5 \times 10^{-5} \text{ m}^3, \quad V_{20} = 5.36 \times 10^{-5} \text{ m}^3, \quad \beta_e = 690 \text{ MPa},$$

$$C_{tm} = 1 \times 10^{-5} \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{MPa}), \quad \rho = 870 \text{ kg/m}^3, \quad m = 40 \text{ kg},$$

$$\tau_v = 0.0008 \text{ s}, \quad k_v = 0.25 \text{ A}^{-1}, \quad C_d = 0.65, \quad w = \pi/6 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{m}.$$

设定理想跟踪轨迹 $x_{1d} = 0.8\sin t$, 取 $D_1 = 0.01\sin(2t)$, $D_2 = 0.2\cos(2t)$, 初始状态为 $\mathbf{x} = [1 \ 0 \ 0]^T$, $x_{2d}(0) = \bar{x}_2(0) = 0$, $x_{3d}(0) = \bar{x}_3(0) = 0$. 第一个 RBF 网络结构取 2 输入 8 隐层 1 输出. 网络输入为 x_1, x_2 , 网络权值初始化均为 0, 根据输入范围基函数中心分布在 $[-9, 9]$ 范围, 宽度取 10. 第二个 RBF 网络结构取 2 输入 8 隐层 1 输出. 网络输入为 x_2, x_3 , 网络权值初始化均为 0, 根据输入范围基函数中心分布在 $[-9, 9]$ 范围, 宽度取 10. 控制参数选取如下: $\rho_1 = 0.1, \rho_2 = 0.05, r = 0.01, c_1 = 1.5, c_2 = 2, c_3 = 1, \eta_1 = 0.05, \eta_2 = 0.01, \Gamma_1 = \text{diag}(5), \Gamma_2 = \text{diag}(10), \tau_2 =$

$$\tau_3 = 0.05.$$

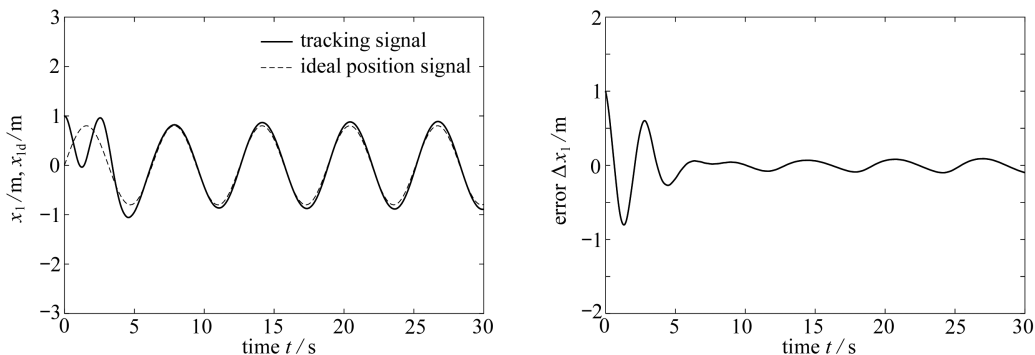


图2 位置跟踪曲线及跟踪误差

Fig. 2 The position tracking curve and the tracking error

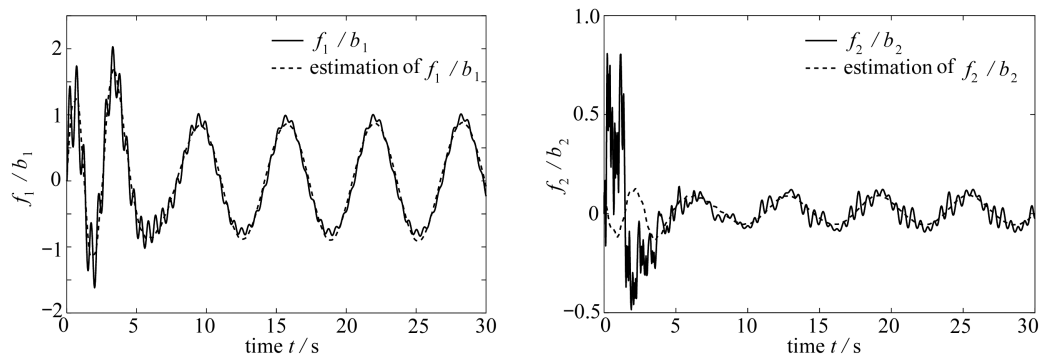


图3 逼近曲线

Fig. 3 The approximation curves

图2表示喷杆位置系统在控制输入信号作用下,喷杆实际输出位置高度能够较好地仿形跟踪给定参考冠层高度值,且跟踪误差逐渐减小,保持在较小的区域范围内且满足喷杆喷洒的精度要求.图3表示RBF网络逼近整个喷杆位置系统的非线性函数效果图,可以看出RBF网络对非线性函数逼近效果良好、误差较小,仿真验证了设计的喷杆位置伺服控制器具有良好的仿形跟踪控制性能和稳定性能,对植保机喷杆位置的升降调节起到了良好的控制效果.

5 结 论

为了实现喷雾机喷杆快速稳定而又精准地伺服跟踪植物冠层高度,选用电液伺服系统作为其位置调节装置,提出了一种采用RBF网络自适应动态面控制方法.建立完整数学模型,采用RBF网络逼近非线性函数,加入阻尼项补偿干扰对系统的影响,结合动态面方法进行控制器设计.避免了传统反步控制中“膨胀”的问题,简化控制器结构.仿真结果表明设计的控制器性能良好、精度较高,很好地克服了参数不确定性、外界干扰以及强非线性特性对系统的影响.

参考文献 (References):

- [1] 陈晨, 薛新宇, 顾伟, 等. 喷雾机喷杆结构形状及截面尺寸优化与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(9): 50-56. (CHEN Chen, XUE Xinyu, GU Wei, et al. Experiment and structure shape and section size optimization of spray boom[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(9): 50-56. (in Chinese))

- [2] 陈树人, 韩红阳, 陈刚, 等. 喷杆喷雾机机架动态特性分析与减振设计[J]. 农业机械学报, 2013, **44**(4): 50-53. (CHEN Shuren, HAN Hongyang, CHEN Gang, et al. Dynamic characteristic analysis and vibration reduction design for sprayer frame[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, **44**(4): 50-53. (in Chinese))
- [3] 陈双, 宗长富, 张立军, 等. 主动悬架平顺性和侧倾姿态综合控制策略[J]. 吉林大学学报(工学版), 2011, **41**(2): 59-64. (CHEN Shuang, ZONG Changfu, ZHANG Lijun, et al. Research on integrated control strategy of ride and roll attitude via active suspension[J]. *Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition)*, 2011, **41**(2): 59-64. (in Chinese))
- [4] 吴吉麟, 苗玉斌. 不同激励源下宽幅喷雾机喷杆的动态特性分析[J]. 农业工程学报, 2012, **28**(4): 39-44. (WU Jilin, MIAO Yubin. Dynamic characteristic analysis of boom for wide sprayer with different exciting sources[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, **28**(4): 39-44. (in Chinese))
- [5] 陈文坊, 邱白晶, 杨宁, 等. 基于超声波传感器的喷杆位姿控制系统[J]. 农机化研究, 2013, **34**(3): 84-87. (CHEN Wenfang, QIU Baijing, YANG Ning, et al. Spray boom position control system based on ultrasonic sensors[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2013, **34**(3): 84-87. (in Chinese))
- [6] 魏新华, 邵菁, 缪丹丹, 等. 喷杆式喷雾机喷杆高度及平衡在线调控系统[J]. 农业机械学报, 2015, **46**(8): 66-71. (WEI Xinhua, SHAO Jing, MIAO Dandan, et al. Online control system of spray boom height and balance[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, **46**(8): 66-71. (in Chinese))
- [7] 石胜利, 李建雄, 方一鸣. 具有输入饱和的电液伺服系统反步位置跟踪控制[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, **47**(10): 3369-3374. (SHI Shengli, LI Jianxiong, FANG Yiming. Backstepping position tracking control for electro-hydraulic servo system with input saturation[J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 2016, **47**(10): 3369-3374. (in Chinese))
- [8] SUN Y B, GUO Q D. Feedback linearization speed-tracking control of linear servo system based on sliding mode observer[J]. *Journal of Control Theory and Applications*, 2014, **21**(6): 391-397.
- [9] 俞珏, 庄健, 于德弘. 采用李雅普诺夫函数的电液伺服系统反馈线性化控制[J]. 西安交通大学学报, 2014, **48**(7): 71-76. (YU Jue, ZHUANG Jian, YU Dehong. Feedback linearization control for an electro-hydraulic servo system using Lyapunov functions[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2014, **48**(7): 71-76. (in Chinese))
- [10] 杨四阳, 韩江, 张魁榜, 等. 电液位置伺服系统的鲁棒自适应控制[J]. 应用数学和力学, 2017, **38**(6): 676-684. (YANG Siyang, HAN Jiang, ZHANG Kuibang, et al. A robust adaptive backstepping control method for electro-hydraulic position servo systems[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2017, **38**(6): 676-684. (in Chinese))
- [11] 陈光荣, 王军政, 汪首坤, 等. 自适应鲁棒控制器设计新方法在电液伺服系统中的应用[J]. 自动化学报, 2016, **42**(3): 375-384. (CHEN Guangrong, WANG Junzheng, WANG Shoukun, et al. Application of a new adaptive robust controller design method to electro-hydraulic servo system[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2016, **42**(3): 375-384. (in Chinese))
- [12] 方一鸣, 许衍泽, 李建雄. 具有输入饱和的电液伺服位置系统自适应动态面控制[J]. 控制理论与应用, 2014, **31**(4): 511-518. (FANG Yiming, XU Yanze, LI Jianxiong. Adaptive dynamic surface control for electro-hydraulic servo position system with input saturation[J]. *Control Theory & Applications*, 2014, **31**(4): 511-518. (in Chinese))
- [13] 吴忠强, 夏青, 彭艳, 等. 高阶非线性液压辊缝系统的 Backstepping 动态面控制[J]. 仪器仪表

- 学报, 2012, **33**(4): 949-954. (WU Zhongqiang, XIA Qing, PENG Yan, et al. Backstepping dynamic surface control for high-order nonlinear hydraulic roll gap system[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, **33**(4): 949-954. (in Chinese))
- [14] WONHEE K, SHIN D, WON D, et al. Disturbance observer based position tracking controller in the presence of biased sinusoidal disturbance for electrohydraulic actuators [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2013, **21**(6): 2290-2298.
- [15] SHI S L, FANG Y M, LI J X, et al. Adaptive position tracking control for electro-hydraulic servo system with input saturation[J]. *ICIC Express Letters*, 2012, **6**(10): 2699-2704.
- [16] WEN C Y, ZHOU J, LIU Z T, et al. Robust adaptive control of uncertain nonlinear systems in the presence of input saturation and external disturbance [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2017, **56**(7): 1672-1678.
- [17] 张天平, 施泉铖, 沈启坤. 具有未建模动态的自适应神经网络动态面控制[J]. 控制理论与应用, 2013, **30**(4): 475-481. (ZHANG Tianping, SHI Xiaocheng, SHEN Qikun. Adaptive neural-network dynamic surface-control with unmodeled dynamics[J]. *Control Theory & Applications*, 2013, **30**(4): 475-481. (in Chinese))

Adaptive RBF-Network Dynamic Surface Tracking Control of Sprayer Boom Systems

LU Zeyang, LI Shujiang, WANG Xiangdong

(School of Information Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, P.R.China)

Abstract: To realize fast and accurate servo tracking of the canopy height, an electro-hydraulic servo system was used for the position adjustment device. The electro-hydraulic servo system was modeled with the load of the sprayer boom. First, the strong non-linearity and parameters' uncertainties were well considered and the complete system model was built, and the controller was designed with the dynamic surface control method. Then the RBF network was used to approximate the non-linearity and uncertainty functions, the control law was applied with damping terms to compensate for the disturbance influences on the system, and all the signals in the closed loop system were proved to be uniformly bounded based on the Lyapunov stability method. Finally, simulation and verification of a sprayer boom with the electro-hydraulic servo system were conducted. The results show that the designed controller has good copy tracking performances.

Key words: sprayer boom; electro-hydraulic servo system; dynamic surface control; copy tracking

引用本文/Cite this paper:

芦泽阳, 李树江, 王向东. 采用 RBF 网络的喷雾机喷杆自适应动态面跟踪控制[J]. 应用数学和力学, 2019, **40**(7): 801-809.

LU Zeyang, LI Shujiang, WANG Xiangdong. Adaptive RBF-network dynamic surface tracking control of sprayer boom systems[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2019, **40**(7): 801-809.