

文章编号: 1000-8055(2003)03-0420-08

基于小波神经网络的 自适应飞/推控制系统设计

陈 谋, 姜长生, 吴庆宪, 曹邦武
(南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 基于小波神经网络提出了一种 H^∞ 自适应控制方法。控制器由等效控制器和 H^∞ 控制器两部分组成。用小波神经网络逼近非线性函数, 并把逼近误差引入到权值的自适应律中用以改善系统的动态性能。 H^∞ 控制器用于减弱外部及神经网络的逼近误差对跟踪的影响。所设计的控制器不仅保证了闭环系统的稳定性, 而且使外部干扰及神经网络的逼近误差对跟踪的影响减小到给定的性能指标。最后基于所设计的控制方法对新一代歼击机设计了飞/推控制系统, 并对飞机作大迎角机动仿真。仿真结果表明所设计的飞/推控制系统是有效的, 同时验证了所设计的非线性控制方法是有效性的。

关键词: 航空、航天推进系统; 小波神经网络; 自适应控制; H^∞ 控制; 飞/推控制
中图分类号: V249.122 **文献标识码:** A

Design for Adaptive Flight/Propulsion Control System Based on Wavelet Neural Networks

CHEN Mou, JIANG Chang-sheng, WU Qing-xian, CAO Bang-wu
(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In this paper, an adaptive H^∞ control method based on wavelet neural network is proposed for the nonlinear uncertain systems. The controller is made up of equivalent controller and H^∞ controller. The wavelet neural networks are used to approximate the nonlinear functions and the approximation errors of the neural networks are introduced to the adaptive law in order to improve the quality of the system. H^∞ controller is designed for attenuating the external disturbance and approximation errors of the neural networks. The controller can not only guarantee the stability of the overall system, but also attenuate the effect of the external disturbance and approximation errors of the neural networks to a prescribed level. At last, based on forgoing designed control method a flight/propulsion control system has been designed and high angle attack flight simulation has been made. The simulation results suggest that the flight/propulsion control system is valid. They validate the availability of this control method for the uncertain nonlinear system too.

Key words: aerospace propulsion system; wavelet neural networks; adaptive control;
 H^∞ control; flight/propulsion control

收稿日期: 2002-07-16; 修订日期: 2002-10-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60174045); 航空第一集团基金资助项目(01D52025)

作者简介: 陈谋(1975-), 男, 四川蓬安人, 南京航空航天大学自动化学院博士生。

1 引言

尽管目前飞控系统运用现代控制理论取得了良好的飞行品质,但大多数控制技术都是针对线性飞机模型有效。事实上飞机模型是一个复杂的非线性系统,经过线性化后的飞机模型不能完全代表飞机飞行的真实状态。特别是对具有超机动飞行能力的新一代歼击机由于其飞行的高敏捷性,个个状态严重耦合且呈严重的非线性,此时线性控制方法已达不到所需要的飞行品质。这就要求针对非线性飞机模型设计出有效的控制方法以满足机动飞行控制的需要。因此采用非线性控制方法来控制飞机非线性模型引起广泛的研究。

目前用非线性控制理论研究飞控系统的方法主要有:反馈线性化^[1]、变结构控制^[2,3]、非线性预测控制^[4,5]、非线性 H^∞ 控制^[6,7]、非线性动态逆控制^[8~10]。因为 H^∞ 控制对干扰和不确定性的鲁棒控制作用而得到了广泛重视。但多数 H^∞ 控制基

于偏微分方程解的基础之上,而偏微分方程求解有很大难度^[11]。而神经网络具有良好的非线性逼近、自学习、自适应、鲁棒性、容错性等能力,而小波变换具有时频特性和变焦特性。小波神经网络就是集合了小波变换和神经网络的各自优点形成的一种避免局部最优和网络结构设计的盲目性,大大简化训练的一种新型神经网络。它已大量运用于信号处理、函数逼近、求解偏微分方程等领域^[12]。本文基于小波神经网络针对一类不确定非线性系统提出了一种新的自适应 H^∞ 控制方法,并把该种控制方法运用于新一代歼击机的飞/推控制系统设计中得到了满意的控制效果。

2 基于小波神经网络的自适应跟踪控制器设计

考虑如下形式的 MIMO 仿射不确定非线性系统:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ &\dots\dots\dots \\ \dot{x}_{r_1-1} &= x_{r_1} \\ &\dots\dots\dots \\ x_{r_1} &= f_1(x) + g_{11}(x)u_1 + \dots + g_{1m}(x)u_m + d_1(x) \\ y_1 &= x_1 \\ &\dots\dots\dots \\ \dot{x}_{n-r_m+1} &= x_{n-r_m+2} \\ &\dots\dots\dots \\ \dot{x}_{r_m-1} &= x_{r_m} \\ x_{r_m} &= f_m(x) + g_{m1}(x)u_1 + \dots + g_{mm}(x)u_m + d_m(x) \\ y_m &= x_{n-r_m+1} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中, $n=r_1+\dots+r_m$; 状态向量 $x \in R^n$, u_i ($0 < i \leq m$) 为控制输入; $y_1, \dots, y_m$ 为系统输出; $d_1, \dots, d_m$ 为外部有界不确定干扰。将 $y_1, \dots, y_m$ 分别微分 $r_1, \dots, r_m$ 次可得如下关系式:

$$\left. \begin{aligned} y_1^{(r_1)} &= f_1(x) + g_{11}(x)u_1 + \dots + g_{1m}(x)u_m + d_1(x) \\ &\dots\dots\dots \\ y_m^{(r_m)} &= f_m(x) + g_{m1}(x)u_1 + \dots + g_{mm}(x)u_m + d_m(x) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

也可写为:

$$\begin{bmatrix} y_1^{(r_1)} \\ \vdots \\ y_m^{(r_m)} \end{bmatrix} = f(x) + G(x) \begin{bmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_m \end{bmatrix} + d(x) \quad (3)$$

其中:

$$G(x) = \begin{bmatrix} g_{11}(x) & \dots & g_{1m}(x) \\ \vdots & \dots & \vdots \\ g_{m1}(x) & \dots & g_{mm}(x) \end{bmatrix}, \quad f(x) = \begin{bmatrix} f_1(x) \\ \vdots \\ f_m(x) \end{bmatrix}, \quad d(x) = \begin{bmatrix} d_1(x) \\ \vdots \\ d_m(x) \end{bmatrix}$$

本文的控制目标是设计自适应神经网络控制器使系统的各个输出 y_i 及其至 r_i-1 阶导数 y_i ,

$\dots, y^{(r_i-1)}$ 跟踪有界的参考信号 y_{id} 及其相应阶的导数。定义:

$$e_i = y_i - y_{id} \quad (i = 1, \dots, m)$$

进行控制器设计之前,先对(3)作如下假设:

(1) 在紧集 $S \subset R^n$ 上, $G(x)$ 非奇异且其范数有界,且有以下式子成立:

$$\sigma_G[G(x)] \geq b > 0 \quad \forall x \in S \quad (4)$$

其中: σ_G 为矩阵 $G(x)$ 的最小奇异值, b 为任意常数。

(2) $f(x)$ 和 $d(x)$ 为光滑函数,且 $d(x)$ 有界。

$$\hat{G}(x \setminus w_g) = \begin{bmatrix} \hat{g}_{11}(x \setminus w_{g_{11}}) & \dots & \hat{g}_{1m}(x \setminus w_{g_{1m}}) \\ \vdots & \dots & \vdots \\ \hat{g}_{m1}(x \setminus w_{g_{m1}}) & \dots & \hat{g}_{mm}(x \setminus w_{g_{mm}}) \end{bmatrix}$$

$$\hat{f}(x \setminus w_f) = [\hat{f}_1(x \setminus w_{f_1}), \dots, \hat{f}_m(x \setminus w_{f_m})]^T, \quad u_a = \begin{bmatrix} u_{1a} \\ \vdots \\ u_{ma} \end{bmatrix}$$

(u_{ia} 在后面定义), 这里的 $\hat{f}(x \setminus w_f)$ 和 $\hat{G}(x \setminus w_g)$ 为小波神经网络对 $f(x)$ 和 $G(x)$ 的逼近, 且定义:

$$\begin{aligned} \tau_1 &= y_1^{(r_1)} + \lambda_{r_1}(y_1^{(r_1-1)} - y_1^{(r_1-1)}) + \dots + \lambda_{11}(y_{1d} - y_1) \\ &\vdots \\ \tau_m &= y_m^{(r_m)} + \lambda_{r_m}(y_m^{(r_m-1)} - y_m^{(r_m-1)}) + \dots + \lambda_{m1}(y_{md} - y_m) \end{aligned} \quad (7)$$

其中, $\lambda_{ij} (j=1, \dots, r_i)$ 应使多项式 $h_i(s) = s^n + \lambda_{ir_i}s^{n-1} + \dots + \lambda_{i1}$ 的所有根位于左半开平面上, $y_{1d}, \dots, y_{md}$ 为 $y_1, \dots, y_m$ 相应的有界参考信号。将(5)代入(3)即可得:

$$\begin{bmatrix} y_1^{(r_1)} \\ \vdots \\ y_m^{(r_m)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1(x) - \hat{f}_1(x \setminus w_{f_1}) \\ \vdots \\ f_m(x) - \hat{f}_m(x \setminus w_{f_m}) \end{bmatrix} + [G(x) - \hat{G}(x \setminus w_g)] \begin{bmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \vdots \\ \tau_m \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_{1a} \\ \vdots \\ u_{ma} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_1(x) \\ \vdots \\ d_2(x) \end{bmatrix} \quad (8)$$

再将(7)代入(8)可得:

$$\begin{aligned} &\begin{bmatrix} e_1^{(r_1)} + \lambda_{1r_1}e_1^{(r_1-1)} + \dots + \lambda_{11}e_1 \\ \vdots \\ e_m^{(r_m)} + \lambda_{mr_m}e_m^{(r_m-1)} + \dots + \lambda_{m1}e_m \end{bmatrix} = \\ &\begin{bmatrix} \hat{f}_1(x \setminus w_{f_1}) - f_1(x) \\ \vdots \\ \hat{f}_m(x \setminus w_{f_m}) - f_m(x) \end{bmatrix} + [\hat{G}(x \setminus w_g) - \hat{G}(x)] \begin{bmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{1a} \\ \vdots \\ u_{ma} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_1(x) \\ \vdots \\ d_2(x) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (9)$$

先设计各子系统的基于神经网络的自适应鲁棒控制律, 然后在考虑系统全局稳定。

对第 i 个子系统:

$$e_i^{(r_i)} + \lambda_{ir_i}e_i^{(r_i-1)} + \dots + \lambda_{i1}e_i = \hat{f}_i(x \setminus w_{f_i}) - f_i(x) + \Delta G_i u + u_{ia} - d_i(x) \quad (10)$$

式中:

$$\Delta G_i = [\hat{g}_{i1}(x \setminus w_{g_{i1}}) - g_{i1}(x), \dots, \hat{g}_{im}(x \setminus w_{g_{im}}) - g_{im}(x)]$$

定义 $e_{ip} = [e_i, \dots, e_i^{(i-1)}]^T$, 则上式可变为:

$$\dot{e}_{ip} = A_i e_{ip} + B_i u_{ia} + B_i [\hat{f}_i(x) - \hat{f}_i(x \setminus w_{f_i}) + \Delta G_i u + d_i(x)] \quad (11)$$

式中:

$$A_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\lambda_{i1} & -\lambda_{i2} & \dots & -\lambda_{i(r_i-1)} & -\lambda_{iri} \end{bmatrix} \quad B_i = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}$$

现设计任务是构造控制器 u_{ia} 及自适应律 w_{fi} 和 $w_{g_{ij}}$, ($j=1, \dots, m$), 实现第 i 个子系统的控制目标。定义:

$$\left. \begin{aligned} w_{fi}^* &= \arg \min_{w_{fi} \in \Omega_{fi}} \left[\sup_{x \in U_i} |\hat{f}_i(x|w_{fi}) - f_i(x)| \right] \\ w_{g_{ij}}^* &= \arg \min_{w_{g_{ij}} \in \Omega_{g_{ij}}} \left[\sup_{x \in U_i} |\hat{g}_{ij}(x|w_{g_{ij}}) - f_{ij}(x)| \right] \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中:

$$\Omega_{fi} = \{w_{fi} : \|w_{fi}\| \leq M_{fi}\}, \quad \Omega_{g_{ij}} = \{w_{g_{ij}} : \|w_{g_{ij}}\| \leq M_{g_{ij}}\}$$

分别为参数的可行域, 其中 M_{fi} 和 $M_{g_{ij}}$ 为设计参数。定义小波神经网络的最小逼近误差为:

$$\omega_{ni} = [\hat{f}_i(x|w_{fi}^*) - f_i(x)] + \Delta G_i^* u \quad (13)$$

式中:

$$\Delta G_i^* = [\hat{g}_{i1}(x|w_{g_{i1}}^*) - g_{i1}(x), \dots, \hat{g}_{im}(x|w_{g_{im}}^*) - g_{im}(x)]$$

将式(13)代入(11)可得:

$$\dot{e}_{ip} = A_i e_{ip} + B_i u_{ia} + B_i [\hat{f}_i(x|w_{fi}) - \hat{f}_i(x|w_{fi}^*) + (\Delta G_i - \Delta G_i^*)u] + B_i [\omega_{ni} - d_i(x)] \quad (14)$$

若把 $\hat{f}(\cdot)$ 和 $\hat{g}_{ij}(\cdot)$ 选为小波神经网络, 则有:

$$\hat{f}_i(x|w_{fi}) = w_{fi}^T \Phi_i(x), \quad \hat{g}_{ij}(x|w_{g_{ij}}) = w_{g_{ij}}^T \Phi_{ij}(x) \quad (15)$$

而根据小波神经网络理论具有如下形式:

$$y_i = \sum_{j=1}^m w_j \Phi_j(\xi) = w^T \Phi(\xi) \quad (16)$$

式中, $w = [w_1, \dots, w_m]^T$ 为网络权值, $\Phi(\xi) = [\varphi_1(\xi), \dots, \varphi_m(\xi)]^T$, $\varphi(\xi)$ 为小波基函数, 则式(11)可重写为:

$$\dot{e}_{ip} = A_i e_{ip} + B_i u_{ia} + B_i [\tilde{w}_{fi}^T \Phi_i(x) + \tilde{w}_{gi}^T \Phi_{gi}(x)u] + B_i \omega_i \quad (17)$$

上式中:

$$\begin{aligned} \omega_i &= \omega_{ni} - d_i, \quad \tilde{w}_{fi} = w_{fi} - w_{fi}^*, \\ \tilde{w}_{gi} &= [(w_{g_{i1}} - w_{g_{i1}}^*), \dots, (w_{g_{im}} - w_{g_{im}}^*)], \quad \Phi_{gi}(x) = [\varphi_{i1}(x), \dots, \varphi_{im}(x)] \end{aligned}$$

同时称 ω_i 为复合干扰。

取 H^∞ 控制器为:

$$u_{ia} = -B_i^T p_i e_{ip} / \gamma \quad (18)$$

其中, γ 为设计参数。取权值参数自适应律为:

$$\begin{aligned} \dot{w}_{fi} &= \\ \left\{ \begin{aligned} & -\mu_i e_{ip}^T p_i B_i \Phi_i(x) + \varepsilon_i (\|w_{fi}\| - M_{fi}), \quad \|w_{fi}\| \leq M_{fi}, \quad e_{ip}^T p_i B_i w_{fi}^T \Phi_i(x) > 0, \quad w_{fi}^T \cdot w_{fi}^* > 0 \\ & P_{r_1}[\cdot], \quad \|w_{fi}\| = M_{fi}, \quad e_{ip}^T p_i B_i w_{fi}^T \Phi_i(x) < 0, \quad w_{fi}^T \cdot w_{fi}^* < 0 \end{aligned} \right. \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \dot{w}_{g_{ij}} &= \\ \left\{ \begin{aligned} & -\rho_{ij} e_{ip}^T p_i B_i \Phi_{ij}(x) + \sigma_{ij} (\|w_{g_{ij}}\| - M_{g_{ij}}), \quad \|w_{g_{ij}}\| \leq M_{g_{ij}}, \quad e_{ip}^T p_i B_i w_{g_{ij}}^T \Phi_{ij}(x) > 0, \quad w_{g_{ij}}^T \cdot w_{g_{ij}}^* > 0 \\ & P_{r_2}[\cdot], \quad \|w_{g_{ij}}\| = M_{g_{ij}}, \quad e_{ip}^T p_i B_i w_{g_{ij}}^T \Phi_{ij}(x) < 0, \quad w_{g_{ij}}^T \cdot w_{g_{ij}}^* < 0 \end{aligned} \right. \end{aligned} \quad (20)$$

其中, μ_i 和 ρ_{ij} 为小波神经网络的学习率, 投影算子 P_{r_i} 定义为:

$$P_{r_1}[\cdot] = -\mu_i e_{ip}^T p_i B_i \Phi_i(x) + \mu_i \frac{e_{ip}^T p_i B_i w_{fi} w_{fi}^T \Phi_i(x)}{\|w_{fi}\|^2} \quad (21)$$

$$P_{r_2}[\cdot] = -\rho_{ij} e_{ip}^T p_i B_i \Phi_{ij}(x) + \rho_{ij} \frac{e_{ip}^T p_i B_i w_{g_{ij}} w_{g_{ij}}^T \Phi_{ij}(x)}{\|w_{g_{ij}}\|^2} \quad (22)$$

设计参数 ε_i 和 σ_{ij} 定义为:

$$\varepsilon_i = \alpha_i \operatorname{sgn}(w_{fi}), \quad \sigma_{ij} = \beta_{ij} \operatorname{sgn}(w_{g_{ij}}) \quad (23)$$

式中, $\alpha_i > 0, \beta_{ij} > 0$ 为常数向量, 其作用是调节系统的动态性能, 设计时给定。 $p_i = p_i^T > 0$ 是如下 Riccati 方程的解:

$$p_i A_i + A_i^T p_i + Q_i - \frac{2}{\gamma} p_i B_i B_i^T p_i + \frac{1}{k^2} p_i B_i B_i^T p_i = 0 \quad Q_i > 0 \quad (24)$$

3 系统性能分析

定理 1 考虑系统(3), 其控制量为式(5), u_c 取如式(6)的形式, 取式(19)和(20)为参数向量的自适应律, 则有:

(1) 在自适应控制过程中始终能保持:

$$\|w_{fi}\| \leq M_{fi} \quad \|w_{gij}\| \leq M_{gij} \quad (1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq m)$$

(2) 对于给定的干扰减弱水平 $k(k > 0)$, 在控制器(5)的作用下输出跟踪误差 e 满足如下的 H^∞ 跟踪性能指标:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \int_0^T e^T Q e dt &\leq \frac{1}{2} e^T(0) P e(0) + \sum_{i=1}^m \frac{1}{2\mu_i} \tilde{w}_{fi}^T(0) \tilde{w}_{fi}(0) + \\ &\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \frac{1}{2\rho_{ij}} \tilde{w}_{gij}^T(0) \tilde{w}_{gij}(0) + \frac{1}{2} \kappa^2 \int_0^T \omega^T \omega dt \end{aligned} \quad (25)$$

其中有:

$$\begin{aligned} e &= [e_{1p}^T, \dots, e_{mp}^T]^T, \quad Q = \text{Diag}(Q_1, \dots, Q_m), \\ \omega &= [\omega_1, \dots, \omega_m]^T, \quad P = \text{Diag}(P_1, \dots, P_m) \end{aligned}$$

证明:

(1) 设 $V_{fi} = \frac{1}{2} w_{fi}^T w_{fi}$, 当 $\|w_{fi}\| \leq M_{fi}$ 时, 由式(19)和(23)的第一式可知:

$$\dot{V}_{fi} = - \sum_{i=1}^m \mu_i e_{ip}^T p_i B_i w_{fi}^T \Phi_i(x) + w_{fi}^T \epsilon_i (\|w_{fi}\| - M_{fi}) < 0 \quad (26)$$

因此此时总可保持 $\|w_{fi}\| \leq M_{fi}$ 。

当 $\|w_{fi}\| = M_{fi}$ 时, 由式(19)的第二式可知: $\dot{V}_{fi} = 0$, 即有 $\|w_{fi}\| \leq M_{fi}$ 。

所以对任意 $t \geq 0$ 均有 $\|w_{fi}\| \leq M_{fi}$ 。同理可证, 对任意的 $t \geq 0$, 均有 $\|w_{gij}\| \leq M_{gij}$ 。

(2) 定义:

$$V_i = \frac{1}{2} e_{ip}^T p_i e_{ip} + \frac{1}{2\mu} \tilde{w}_{fi}^T \tilde{w}_{fi} + \sum_{j=1}^m \frac{1}{2\rho_{ij}} \tilde{w}_{gij}^T \tilde{w}_{gij} \quad (27)$$

则构造 Lyapunov 函数为 $V = V_1 + V_2 + \dots + V_m$

取 V 对 t 的导数可得:

$$\dot{V} = \dot{V}_1 + \dot{V}_2 + \dots + \dot{V}_m \quad (28)$$

而又有:

$$\dot{V}_i = \frac{1}{2} \dot{e}_{ip}^T p_i e_{ip} + \frac{1}{2} e_{ip}^T p_i \dot{e}_{ip} + \frac{1}{\mu_i} \dot{\tilde{w}}_{fi}^T \tilde{w}_{fi} + \sum_{j=1}^m \frac{1}{\rho_{ij}} \dot{\tilde{w}}_{gij}^T \tilde{w}_{gij} \quad (29)$$

由于 $\dot{\tilde{w}}_{fi} = \dot{w}_{fi}$, $\dot{\tilde{w}}_{gij} = \dot{w}_{gij}$, 利用式(17), 式(19), 式(20), 式(23)和式(24)可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_i &= - \frac{1}{2} e_{ip}^T Q_i e_{ip} - \frac{1}{2k^2} e_{ip}^T p_i B_i B_i^T p_i e_{ip} + \frac{1}{2} (\omega_i^T B_i^T p_i e_{ip} + e_{ip}^T p_i B_i \omega_i) + \\ &\left(e_{ip}^T p_i B_i \Phi_i^T(x) + \frac{1}{\mu_i} \dot{w}_{fi}^T \right) \tilde{w}_{fi} + \sum_{j=1}^m \left[\left(e_{ip}^T p_i B_i \Phi_{ij}^T(x) u_j + \frac{1}{\rho_{ij}} \dot{w}_{gij} \right) \tilde{w}_{gij} \right] \end{aligned} \quad (30)$$

不难证明式(30)的后两项是非正的, 同时由:

$$\left(\omega_i^T - \frac{1}{\kappa^2} e_{ip}^T p_i B_i \right) \left(\omega_i^T - \frac{1}{\kappa^2} e_{ip}^T p_i B_i \right)^T \geq 0 \quad (31)$$

可得:

$$\dot{V}_i \leq -\frac{1}{2} \mathbf{e}_{ip}^T \mathbf{Q}_i \mathbf{e}_{ip} + \frac{1}{2} \kappa^2 \omega_i^T \omega_i \leq -\frac{1}{2} \mathbf{e}_{ip}^T \mathbf{Q}_i \mathbf{e}_{ip} + \frac{1}{2} \kappa^2 |\bar{\omega}_i|^2 \quad (32)$$

令 $\lambda_{\min}(\cdot)$ 为矩阵 $\mathbf{Q}_i$ 的最小特征值, 则当 $\|\mathbf{e}_{ip}\| > \kappa |\bar{\omega}_i| / \sqrt{\lambda_{\min}(\mathbf{Q}_i)}$ 时有:

$$\dot{V}_i \leq -\frac{1}{2} \lambda_{\min}(\mathbf{Q}_i) \|\mathbf{e}_{ip}\|^2 + \frac{1}{2} \kappa^2 |\bar{\omega}_i|^2 < 0 \quad (33)$$

因此有:

$$\dot{V} = \dot{V}_1 + \dot{V}_2 + \dots + \dot{V}_m < 0$$

所以在所设计的控制器的作用下, 闭环系统具有全局稳定性。

对式(33)从 $t=0$ 到 $t=T$ 积分可得:

$$V_i(T) - V_i(0) \leq -\frac{1}{2} \int_0^T \mathbf{e}_{ip}^T \mathbf{Q}_i \mathbf{e}_{ip} dt + \frac{1}{2} \kappa^2 \int_0^T \omega_i^T \omega_i dt \quad (34)$$

由式(27)可知 $V_i(T) \geq 0$, 联合(27)和式(34)有:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \int_0^T \mathbf{e}_{ip}^T \mathbf{Q}_i \mathbf{e}_{ip} dt &\leq \frac{1}{2} \mathbf{e}_{ip}^T(0) \mathbf{P}_i \mathbf{e}_{ip}(0) + \frac{1}{2\mu} \tilde{\mathbf{w}}_{fi}^T(0) \tilde{\mathbf{w}}_{fi}(0) + \\ &\sum_{j=1}^m \frac{1}{2\rho_{ij}} \tilde{\mathbf{w}}_{s_{ij}}^T(0) \tilde{\mathbf{w}}_{s_{ij}}(0) + \frac{1}{2} \kappa^2 \int_0^T \omega_i^T \omega_i dt \end{aligned} \quad (35)$$

对整个系统而言有:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \int_0^T \mathbf{e}^T \mathbf{Q} \mathbf{e} dt &\leq \frac{1}{2} \mathbf{e}^T(0) \mathbf{P} \mathbf{e}(0) + \sum_{i=1}^m \frac{1}{2\mu_i} \tilde{\mathbf{w}}_{fi}^T(0) \tilde{\mathbf{w}}_{fi}(0) + \\ &\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^m \frac{1}{2\rho_{ij}} \tilde{\mathbf{w}}_{s_{ij}}^T(0) \tilde{\mathbf{w}}_{s_{ij}}(0) + \frac{1}{2} \kappa^2 \int_0^T \omega^T \omega dt \end{aligned} \quad (36)$$

所以设计的控制器对于给定的干扰减弱水平 κ , 取得一定的 H^∞ 跟踪性能。

成的快回路和由 α, β 和 μ 构成的慢回路。慢状态回路的运动方程可描述为:

4 新一代歼击机飞/推控制系统设计

$$\begin{bmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ \dot{\mu} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_\alpha(\mathbf{x}) \\ f_\beta(\mathbf{x}) \\ f_\mu(\mathbf{x}) \end{bmatrix} + g_{s1}(\mathbf{x}) \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} + g_{s1}(\mathbf{x}) \mathbf{u} \quad (38)$$

新一代战机的运动方程完全是 6 自由度 12 状态的非线性方程且各状态变量之间相互耦合, 因此它的模型比较复杂。12 个状态是 x, y 和 z (飞机三个重心运动坐标); V, χ 和 γ (分别为飞行速度、航迹偏转角和飞行航迹角); α, β 和 μ (分别为飞行攻角、侧滑角和滚转角); p, q 和 r (分别为滚转、俯仰和偏航角速率)。不考虑地球的自转, 设地面是局部平坦且具有恒定的重力加速度, 假定飞机在平静大气中运动, 同时不考虑飞机的气动弹性变形, 则可导出飞机的动力学模型为:

$$\dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}, \tau, \delta) \quad (37)$$

式中:

$$\mathbf{x}^T = [x, y, z, V, \chi, \gamma, \alpha, \beta, \mu, p, q, r]$$

$$\delta = [\delta_\mu, \delta_c, \delta_r, \delta_y, \delta_z]$$

其中: δ 的分量分别对应于副翼偏转角, 鸭翼偏转角, 方向舵偏转角, 侧向推力矢量角, 纵向推力矢量角。 $f(\cdot)$ 的详细表达式参见文献[9, 10]。

根据时标分离的原则可以将飞控系统划分为快慢不同的子系统, 本文主要讨论由 p, q 和 r 构

在设计控制率时, 忽略 $\mathbf{u}$ 对 $\dot{\alpha}, \dot{\beta}$ 和 $\dot{\mu}$ 的直接影响。 $\mathbf{u}$ 对 $\dot{\alpha}, \dot{\beta}$ 和 $\dot{\mu}$ 的微小力影响, 对歼击机来说不是气动力控制的主要途径, 因此可将其看作飞/推控制系统所受的扰动。于是慢变子系统可用系统(7)的形式表达, 用前述非线性系统控制器设计方法设计慢变量跟踪控制器, 然后运用非线性动态逆方法求解快变子系统的控制律。快变量控制器采用动态逆控制, 在此不再详细讨论, 可参见文献[9, 10]; 基于小波神经网络的飞/推控制系统结构图如图 1。其中小波神经网络用来补偿快变量动态逆控制的误差, 并对 p_c, q_c 和 r_c 进行限幅处理。

对飞机作大迎角机动仿真验证该飞/推控制系统的有效性。初始值设定如下:

$$H = 1500 \text{ m}, \quad V = 100 \text{ m/s}$$

$$\gamma = \chi = 0^\circ, \quad \alpha = 5^\circ$$

$$\beta = \mu = 0^\circ, \quad p = q = r = 0 \text{ rad/s}$$

$$\text{初始发动机推力: } T = 125 \text{ kN}$$

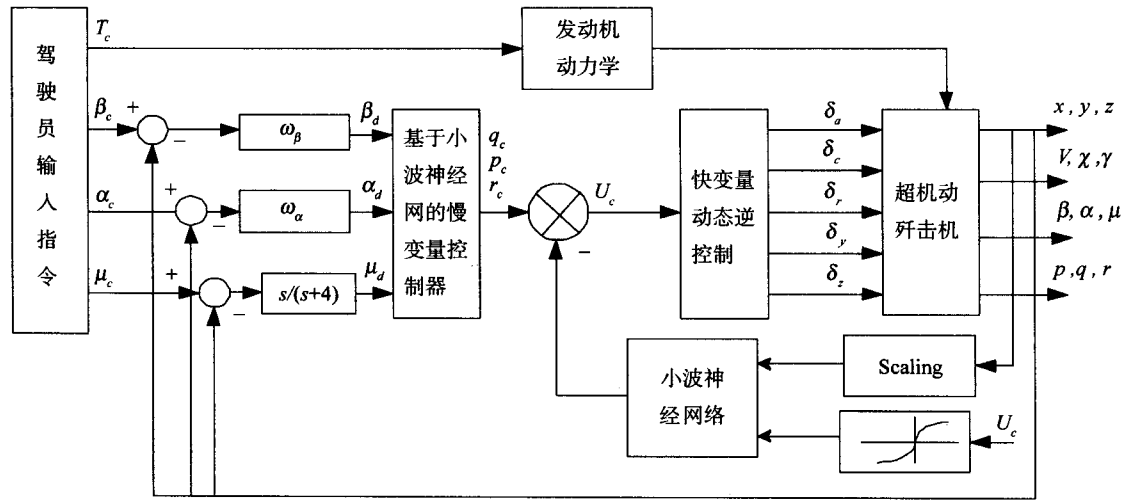


图 1 基于小波神经网络的飞/推控制系统方块图

Fig. 1 Block diagram of flight/propulsion control system based on wavelet neural network

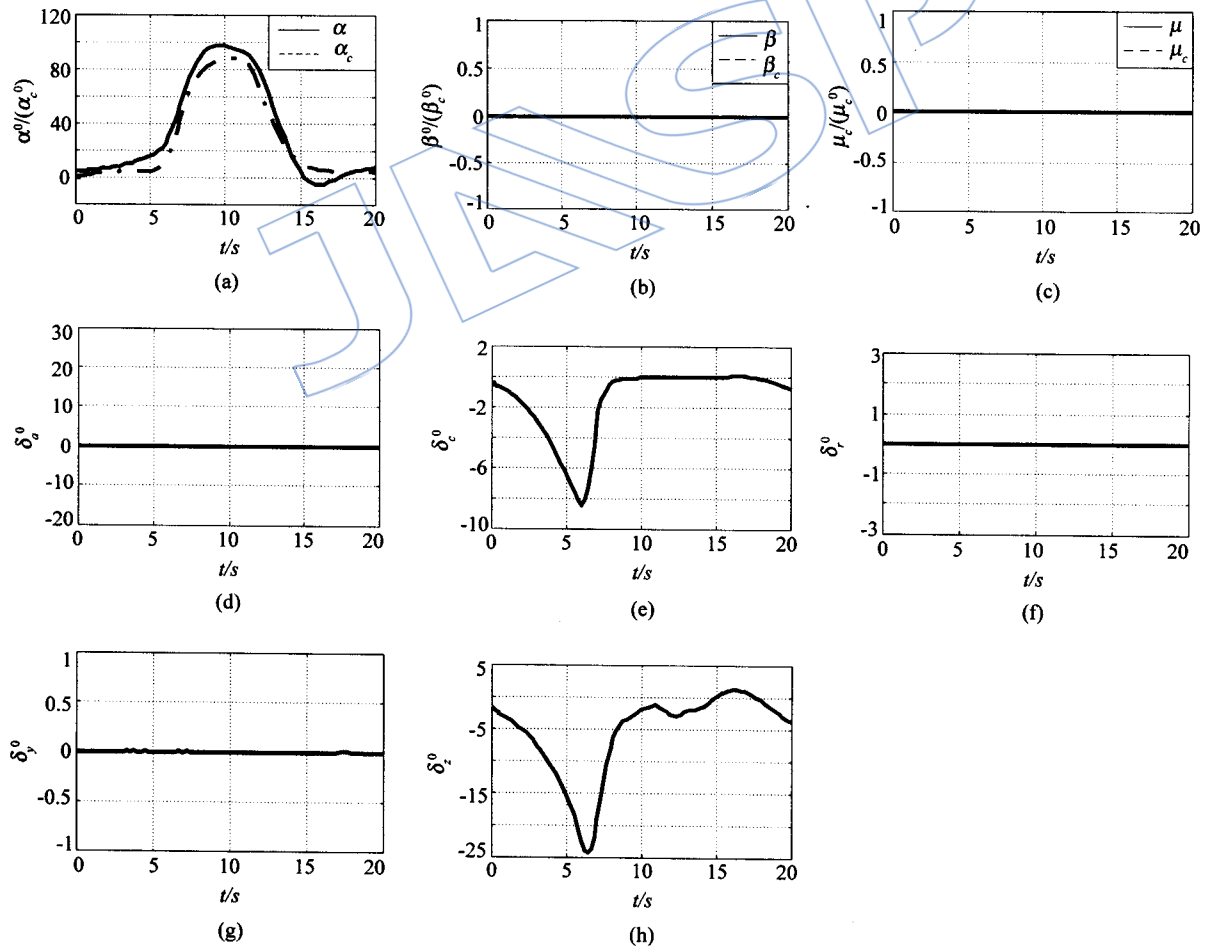


图 2 基于小波神经网络的大迎角机动仿真曲线

Fig. 2 Simulation plots of high angle attack flight based on wavelet neural network

各操纵舵面的初始偏转为:

$$\delta_a = \delta_r = \delta_y = \delta_z = 0^\circ, \quad \delta_c = -5^\circ$$

各通道的比例增益为: $K_p = K_q = K_r = 12$

在线神经网络的学习速率取为: $\gamma = 0.05$

在对飞机作大迎角机动进行仿真时,假设快回路气动参数存在 10% 的不确定性,慢回路部分仿真结果如图 2 所示。可见基于小波神经网络的自适应控制方案具有较好的跟踪性能和鲁棒性。

5 结 论

本文基于小波神经网络对一类非线性系统设计鲁棒自适应控制器,并使控制效果满足一定的性能指标。在自适应过程中把小波神经网络的逼近误差引入到权值的自适应律中用以改善系统的动态性能,使系统动态响应加快。最后用该方法控制歼击机飞行控制系统的慢变子系统并取得了良好的控制效果,同时说明所设计的非线性控制方法是有效的。

参考文献:

- [1] Menon P K, Yousefpor M. Design of nonlinear Autopilots for High Angle of Attack Missiles[R]. AIAA Paper 96-3913, July 1996.
- [2] Thukral A, Innocenti M. Control Design Challenge: A Variable Structure Approach, Journal of Guidance, Control, and Dynamics[J]. 1994, 17(5): 942-949.
- [3] Hedrick J K, Gopalswamy S. Nonlinear Flight Control Design Via Sliding Methods, Journal of Guidance, Control, and Dynamics[J]. 1990, 13(5): 850-858.
- [4] Singh S N, Steinberg M, DiGirolamo R D. Nonlinear predictive Control of Feedback Linearizable Systems and Flight control System Design. Journal of Guidance, Control, and Dynamics[J]. 1995, 18(5): 1023-1028.
- [5] Wan E A, Bogdanov A A. Model Predictive Neural Control with Applications to a 6 DOF helicopter model[A]. Proceedings of American Control Conference [C]. Arlington, VA, 2001: 488-93.
- [6] Wise K A, Sedwick J L. Nonlinear Optimal Control for Agile Missiles[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1996, 19(1): 157-165.
- [7] Ciann-Dong Yang, Chien-Chung Kung. Nonlinear Flight Control of General Six-Degree-of-Freedom Motions, Journal of Guidance, Control, and Dynamics[J]. 2000, 23(2): 278-288.
- [8] Li Ming, Jiang Chang-sheng, Ye Wen-qing, et al. Study on Intelligent Control and 3D Real-Time Distributed Animation Simulation for Super-Maneuver Attack of the New Generation Fighter[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2001, 14(4): 235-244.
- [9] 范子强, 方振平. 超机动飞机的非线性飞行控制研究[J]. 北京航空航天大学学报. 2000, 26(4): 404-407.
- [10] 刘淑祥, 郭锁凤, 徐肖豪. 基于动态逆的神经网络超机动飞行控制[J]. 航空学报, 1997, 18(1): 26-30.
- [11] Jeong-Chan Chang. An Adaptive Robust Tracking Control for a Class of Nonlinear Multiple-Input-Multiple-Output (MIMO) Systems[J]. IEEE Transaction on Automatic Control, 46(9): 1432-1437.
- [12] Yu-Min CHENG, Bor-Sen CHEN, Fu-Yuan SHIAN. Adaptive Wavelet Network Control Design for Nonlinear Systems [J]. Proc, Natl, Sci, Counc, ROC (A). 1998, 22(6): 783-799.