

文章编号: 100028055(2009) 10234205

航空发动机神经网络反步控制方法

潘慕绚, 黄金泉, 殷 石
(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 针对航空发动机非线性和不确定性的特点, 提出了一种基于神经网络的反步控制方法. 采用径向基神经网络估计未知系统方程, 并用一种平滑切换法有效避免了控制器奇异问题. 反步法的设计基于 Lyapunov 稳定性原理, 保证了闭环系统一致渐近有界. 最后针对某型涡扇发动机非线性模型设计了高压转速控制器, 仿真结果验证了该方法的有效性.

关 键 词: 航空发动机; 非线性系统; 神经网络; 反步控制

中图分类号: V233.7 **文献标识码:** A

Backstepping control strategy for aero2engine using neural networks
PAN Mu2xuan, HUANG Jin2quan, YIN Shi
(College of Energy and Power Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: A Backstepping control strategy based on neural network was presented in view of nonlinearity and uncertainty of aero2engine. Radial basis function(RBF) neural net2work was used to estimate the equations of the unknown system, and a smooth2switching al2gorithm was proposed to avoid singularity phenomenon. Using Lyapunov stability analysis, the uniformly ultimately boundedness of closed2loop systems was proven. Finally, the com2pressor speed controller was designed based on a nonlinear model of some turbofan engine. The simulation results illustrate the effectiveness of the proposed approach.

Key words: aero2engine; nonlinear system; neural network; backstepping control

航空发动机是一类典型的不确定非线性系统, 目前常用的控制策略都是基于发动机某个运行点的线性化模型来设计线性控制器. 理论上, 可以保证发动机在该运行点附近小范围内的渐进稳定性. 然而由于航空发动机工作在一个较大范围的包线内, 当运行点变化时, 系统的动态特性会显著改变, 线性控制器不能很好地满足控制要求. 因此, 有必要采用具有强适应性的非线性控制方法设计控制器.

近年来, 针对不确定非线性系统的控制研究取得了长足的进步, 其中反步(backstepping)设计方法就是最重要的成果之一^[1]. 然而在反步控制器设计中需要获得一个能反映系统动态关系的解析表达, 这限制了其在实际工程中的应用. 文献[2]基于小偏差线性化模型建立了航空发动机的非线性仿射模型, 在此基础上设计了反步控制律, 但是这种方法并不具有普遍意义. 考虑到神经网络在非线逼近上的优势^[34], 反步法与神经网络结合的技术得到了迅速发展^[28], 但在实际应用中仍然有很多亟待解决的问题. 如为了避免可能出现的控制器奇异问题, 大多假设增益函数为已知常数, 显然该假设在很多情况下不能满足. 对此, 一些文献对增益函数未知时的神经网络反步控制作了研究. 文献[7]采用一种平滑的切换逻辑, 避免出现抖振现象. 文献[8]提出了结合神经网络的切换方法, 但控制律过于复杂而难以应用. 本文针对

航空发动机寻求有工程实用价值的控制逻辑, 改进了文献[8]中的切换逻辑, 结合神经网络给出结构简明的控制律, 有效消除了控制器奇异问题, 并且能够避免对虚拟控制的反复求导, Lyapunov 稳定性原理证明了该闭环系统一致渐近有界. 针对某型涡扇发动机非线性模型, 设计了高压转速控制器进行数字仿真, 结果验证了该方法的有效性.

1 系统描述

对于一类含有未知项的严格反馈非线性系统

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= f_1(x_1) + g_1(x_1)x_2 \\ \dot{x}_2 &= f_2(x_1, x_2) + g_2(x_1, x_2)x_3 \\ &\vdots \\ \dot{x}_n &= f_n(X) + g_n(X)u \\ y &= x_1\end{aligned}\quad (1)$$

其中 $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \in \mathbb{R}^n$. 状态量 $x_i \in \mathbb{R}$, $i \in [1, n]$ 为可测量或可求解的. $u \in \mathbb{R}$, $y \in \mathbb{R}$ 分别为系统的输入和输出. 系统参数 $f_i(\cdot)$ 和 $g_i(\cdot)$ 为未知, 但足够光滑的非线性连续函数. 控制目标是让系统输出 y 跟踪参考指令 y_d .

式(1)中的未知系统参数 f_i 和 g_i 采用神经网络估计, 定义

$$\begin{aligned}f_i &= \hat{f}_i + \tilde{f}_i \\ g_i &= \hat{g}_i + \tilde{g}_i \quad i \in [1, n]\end{aligned}\quad (2)$$

式中 $\hat{f}_i$ 和 $\hat{g}_i$ 为神经网络估值, $\tilde{f}_i$ 和 $\tilde{g}_i$ 为逼近误差. 选用径向基神经网络

$$\begin{aligned}\hat{f}_i &= \hat{H}_i <_{\hat{g}_i} \\ \hat{g}_i &= \hat{H}_i <_{\hat{g}_i} \quad i \in [1, n]\end{aligned}\quad (3)$$

式中 $\hat{H}_i \in \mathbb{R}^{n_f}$ 和 $\hat{H}_i \in \mathbb{R}^{n_g}$ 为权重向量, $<_{\hat{g}_i} \in \mathbb{R}^{n_f}$, $<_{\hat{g}_i} \in \mathbb{R}^{n_g}$ 为高斯核函数.

本文中控制系统设计基于以下假设:

1) 知系统参数 f_i 和 g_i 有界, 且

$$0 < g_{\min, i} \leq |g_i| \leq g_{\max, i}, \quad i \in [1, n]$$

令

$$g_{\text{MID}, i} = (g_{\min, i} + g_{\max, i})/2, \quad i \in [1, n]$$

则可得

$$\left| \frac{g_i}{g_{\text{MID}, i}} - 1 \right| \leq 1 \quad (4)$$

2) f_i 和 g_i 有界, 从而最优神经网络权重 $\hat{H}$ 有界, 且 $\|\hat{H}\| \leq H$, 其中 H 为正常数.

2 控制器设计

1) 第 1 步

定义跟踪误差

$$z_1 = y - y_d = x_1 - y_d \quad (5)$$

$$z_2 = x_2 - A \quad (6)$$

式中 A 为虚拟控制器.

定义一个光滑的切换函数

$$S(\hat{g}_1) > \frac{2}{p} \arctan \left[\left(\frac{\hat{g}_1}{X} \right)^2 \right] \quad (7)$$

式中 $X > 0$ 为切换宽度. 则虚拟控制器 A 由一个等价控制器 A_1 和一个高增益控制器 A_{11} 组成

$$A = A_{11} + A_1 \quad (8)$$

$$A_{11} = \begin{cases} 0 & \hat{g}_1 = 0 \\ S(\hat{g}_1) \frac{h_1}{\hat{g}_1} & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

$$A_1 = [1 - S(\hat{g}_1)] \left[\frac{h_1}{g_{\text{MID}, 1}} - R h_1^2 z_1 \right] \quad (10)$$

式中 $R > 0$ 为设计参数, 且

$$h_1 = -k_1 z_1 - \dot{f}_1 + \dot{y}_d \quad (11)$$

当 A_{11} 的分母 $\hat{g}_1$ 趋于 0 时, 则 $S(\hat{g}_1)$ 也趋于 0, 并且 $\lim_{\hat{g}_1 \rightarrow 0} \frac{S(\hat{g}_1)}{\hat{g}_1} = 0$, 从而可以消除奇异现象, 此时虚拟控制器切换为高增益控制器 A_{11} . 而当 $S(\hat{g}_1) \gg 1$ 时, 说明当前控制器远离奇异, 由一个传统反步法设计的等价控制器 A_1 来提供虚拟控制信号.

对式(5)求导

$$\begin{aligned}\dot{z}_1 &= \dot{x}_1 - \dot{y}_d = f_1 + g_1 x_2 - \dot{y}_d = [1 - S(\hat{g}_1)] \# \\ &\quad \left(\frac{g_1}{g_{\text{MID}, 1}} - R g_1 h_1 z_1 - 1 \right) h_1 + g_1 S(\hat{g}_1) \frac{h_1}{\hat{g}_1} - \\ &\quad k_1 z_1 + \tilde{f}_1 + g_1 z_2 = [1 - S(\hat{g}_1)] \# \\ &\quad \left(\frac{g_1}{g_{\text{MID}, 1}} - R g_1 h_1 z_1 - 1 \right) h_1 - k_1 z_1 + g_1 z_2 + \tilde{H} <_{\hat{g}_1}\end{aligned}\quad (12)$$

式中

$$\begin{aligned}H &= [H_1 - \hat{H}_1, H_1 - \hat{H}_1]^T \\ <_{\hat{g}_1} = \left[<_{\hat{g}_1}, \frac{S(\hat{g}_1)}{\hat{g}_1} h_1 <_{\hat{g}_1} \right]^T\end{aligned}\quad (13)$$

考虑如下的权重调整律:

$$\dot{\hat{H}} = -F_1 \left(z_1 <_{\hat{g}_1} + G \hat{H} \right) \quad (14)$$

式中 F_1 为对称正定矩阵, $G > 0$ 为设计参数. 为了镇定式(12), 选择如下的 Lyapunov 函数:

$$V_1(z_1, H) = \frac{1}{2} \left(z_1^2 + H^T F_1^{-1} H \right) \quad (15)$$

设 H 不随时间变化, 则有: $\dot{H} = -\frac{\#}{\hat{H}}$, 式(15)对时间求导, 并将式(12), (14)代入得

$$\begin{aligned} \dot{V}_1(z_1, H) = & z_1 \dot{z}_1 + H^T F_1^{-1} \dot{H} = z_1 \dot{z}_1 - H^T F_1^{-1} \frac{\#}{\hat{H}} = \\ & z_1 \left\{ \left[1 - S(\hat{g}_1) \right] \left[\frac{g_1}{g_{MID,1}} - R g_1 h_1 z_1 - 1 \right] h_1 - \right. \\ & \left. k_1 z_1 + g_1 z_2 + \bar{H} \leq_1 \right\} + H^T F_1^{-1} \frac{\#}{\hat{H}} = \\ & - k_1 z_1^2 + G H^T \hat{H} - \left[1 - S(\hat{g}_1) \right] R g_1 \# \\ & \left[h_1 z_1 - \left[\frac{1}{2R g_{MID,1}} - \frac{1}{2R g_1} \right]^2 + \right. \\ & \left. \left[1 - S(\hat{g}_1) \right] R g_1 \frac{1}{4R g_1^2} \left[\frac{g_1}{g_{MID,1}} - 1 \right] + g_1 z_1 z_2 \right] \\ & - k_1 z_1^2 + G H^T \hat{H} + g_1 z_1 z_2 + \frac{1}{4R g_{MIN,1}} \end{aligned} \quad (16)$$

2) 第 i 步 ($2 \leq i \leq n-1$)

定义误差

$$z_i = x_i - A_{i-1} \quad (17)$$

虚拟控制由如下两部分组成:

$$A = A_{i-1} + A_i \quad (18)$$

$$A_i = \begin{cases} 0 & \hat{g}_i = 0 \\ S(\hat{g}_i) \frac{h_i}{\hat{g}_i} & \text{其他} \end{cases} \quad (19)$$

$$A_i = \left[1 - S(\hat{g}_i) \right] \left[\frac{h_i}{g_{MID,i}} - R h_i^2 z_i \right] \quad (20)$$

式中 $R > 0$ 为设计参数, 且

$$h_i = -k_i z_i - \hat{f}_{i-1} - \hat{g}_{i-1} z_{i-1} + \hat{A}_{i-1} \quad (21)$$

对式(17)求导

$$\begin{aligned} \dot{z}_i = & \dot{x}_i - \dot{A}_{i-1} = \left[1 - S(\hat{g}_i) \right] \# \\ & \left[\frac{g_i}{g_{MID,i}} - R g_i h_i z_i - 1 \right] h_i - \\ & k_i z_i + g_i z_{i+1} - g_{i-1} z_{i-1} + H^T \leq_i \end{aligned} \quad (22)$$

式中

$$\begin{aligned} H = & [H_i - \hat{H}_i, H_{i-1} - \hat{H}_{i-1}, H_{i-2} - \hat{H}_{i-2}]^T \\ \leq_i = & \left[\leq_{i-1}, \frac{S(\hat{g}_i)}{\hat{g}_i} h_i \leq_{g_i}, z_{i-1} \leq_{i-1} \right]^T \end{aligned} \quad (23)$$

考虑如下的权重调整律:

$$\dot{\hat{H}} = -F_i \left(z_i \leq_i + G \hat{H} \right) \quad (24)$$

式中 F_i 为对称正定矩阵, $G > 0$ 为设计参数. 为了镇定式(22), 选择如下的 Lyapunov 函数:

$$V_i(z_i, H) = V_{i-1}(z_{i-1}, H_{i-1}) + \frac{1}{2} \left(z_i^2 + H^T F_i^{-1} H \right) \quad (25)$$

设 H 不随时间变化, 则有: $\dot{H} = -\frac{\#}{\hat{H}}$, 式(25)对时间求导, 并将式(22)和(24)代入得

$$\begin{aligned} \dot{V}_i(z_i, H) = & \dot{V}_{i-1}(z_{i-1}, H_{i-1}) + z_i \dot{z}_i - H^T F_i^{-1} \frac{\#}{\hat{H}} [\\ & \sum_{j=1}^i \left(-k_j z_j^2 + G H^T \hat{H} + \frac{1}{4R g_{MIN,j}} \right) + g_i z_i z_{i+1} \end{aligned} \quad (26)$$

3) 第 n 步

定义误差

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

给出控制输入

$$u = u_a + u_s \quad (28)$$

$$u_a = \begin{cases} 0 & \hat{g}_n = 0 \\ S(\hat{g}_n) \frac{h_n}{\hat{g}_n} & \text{其他} \end{cases} \quad (29)$$

$$u_s = \left[1 - S(\hat{g}_n) \right] \left[\frac{h_n}{g_{MID,n}} - R h_n^2 z_n \right] \quad (30)$$

式中 $R > 0$ 为设计参数, 且

$$h_n = -k_n z_n - \hat{f}_{n-1} - \hat{g}_{n-1} z_{n-1} + \hat{A}_{n-1} \quad (31)$$

对式(27)求导

$$\begin{aligned} \dot{z}_n = & \dot{x}_n - \dot{A}_{n-1} = \left[1 - S(\hat{g}_n) \right] \# \\ & \left[\frac{g_n}{g_{MID,n}} - R g_n h_n z_n - 1 \right] h_n - \\ & k_n z_n - g_{n-1} z_{n-1} + H^T \leq_n \end{aligned} \quad (32)$$

式中

$$\begin{aligned} H = & [H_n - \hat{H}_n, H_{n-1} - \hat{H}_{n-1}, H_{n-2} - \hat{H}_{n-2}]^T \\ \leq_n = & \left[\leq_{n-1}, \frac{S(\hat{g}_n)}{\hat{g}_n} h_n \leq_{g_n}, z_{n-1} \leq_{n-1} \right]^T \end{aligned} \quad (33)$$

考虑如下的权重调整律:

$$\dot{\hat{H}} = -F_n \left(z_n \leq_n + G \hat{H} \right) \quad (34)$$

式中 F_n 为对称正定矩阵, $G > 0$ 为设计参数. 为了镇定式(32), 选择如下的 Lyapunov 函数:

$$V_n(z_n, H) = V_{n-1}(z_{n-1}, H_{n-1}) + \frac{1}{2} \left(z_n^2 + H^T F_n^{-1} H \right) \quad (35)$$

设 $\mathbf{H}$ 不随时间变化, 则有: $\dot{\mathbf{H}} = -\hat{\mathbf{H}}$, 式(35)对时间求导, 并将式(32)和(34)代入得

$$\dot{\mathbf{V}}_n(\mathbf{z}_n, \mathbf{H}) = \dot{\mathbf{V}}_{n-1}(\mathbf{z}_{n-1}, \mathbf{H}_{n-1}) + \mathbf{z}_n^T \mathbf{Z}_{n-1}^T \tilde{\mathbf{H}} \mathbf{F}_{n-1}^T \hat{\mathbf{H}} \left[\mathbf{E}_j^n \left(-k_j \mathbf{z}_j^2 + \tilde{\mathbf{G}}_j^T \hat{\mathbf{H}}_j + \frac{1}{4R_j g_{\text{MIN},j}} \right) \right] \quad (36)$$

对上式配方, 并由假设^o可得

$$\dot{\mathbf{V}}_n(\mathbf{z}_n, \mathbf{H}) \left[\mathbf{E}_j^n \left[-k_j \mathbf{z}_j^2 - \tilde{\mathbf{G}}_j^T \left(\tilde{\mathbf{H}}_j + \frac{\tilde{\mathbf{G}}_j^2}{2} \right) + \frac{\tilde{\mathbf{G}}_j^2}{4} + \frac{1}{4R_j g_{\text{MIN},j}} \right] \right] \quad (37)$$

因此当

$$|\mathbf{z}_j| \leq \sqrt{\frac{1}{4R_j g_{\text{MIN},j} k_j} + \frac{\tilde{\mathbf{G}}_j^2}{4k_j}} \quad (38)$$

或

$$+\mathbf{H} + \sqrt{\frac{1}{4R_j g_{\text{MIN},j} \tilde{\mathbf{G}}_j} + \frac{\tilde{\mathbf{G}}_j^2}{4\tilde{\mathbf{G}}_j} + \frac{\tilde{\mathbf{G}}_j^2}{2}} \quad (39)$$

时, $\dot{\mathbf{V}}_n(\mathbf{z}_n, \mathbf{H}) \leq 0$. 由 Lyapunov 稳定性扩展定理^[9]知, 系统状态误差 $\mathbf{z}_j$ 和神经网络权重误差 $\mathbf{H}_j$ 一致渐近有界. 由虚拟控制器 A 定义式(8)~(10)可知 A 有界, 则由式(28)~(30)可知实际控制输入 $\mathbf{u}$ 亦有界. 由于误差 $\mathbf{z}_i = \mathbf{x}_i - \mathbf{A}_{i-1}$, 可知系统状态 $\mathbf{x}_i$ 一致渐近有界. 由假设知, 网络理想权重 $\mathbf{H}_j^*$ 和 $\mathbf{H}_j^*$ 有界, 并且由于网络权重误差收敛, 从而权值 $\mathbf{H}_j$ 和 $\mathbf{H}_j$ 亦一致渐近有界, 由此系统所有闭环参量均有界.

3 仿真与分析

以某型涡扇发动机非线性模型为对象, 根据控制系统性能指标的要求(高压转速回路带宽 $X \leq 5 \text{ rad/s}$), 取采样周期为 0.02 s , 采用该方法设计高压转速控制器.

高压转速非线性系统可如下表示^[2]:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_1 = \mathbf{x}_2 \\ \dot{\mathbf{x}}_2 = \mathbf{f}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) + \mathbf{g}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)\mathbf{u} \\ \mathbf{y} = \mathbf{x}_1 \end{cases} \quad (40)$$

其中 $\mathbf{x}_1$ 为高压转速, $\mathbf{u}$ 为燃油量, 选用 RBF(radial basis function)神经网络来逼近 $\mathbf{f}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)$ 和 $\mathbf{g}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)$, RBF 神经元数取 10 个. 径向基函数采用高斯核函数

$$\varphi = \exp \left[-\frac{(\mathbf{x} - \mathbf{c})^2}{2d^2} \right] \quad (41)$$

径向基函数宽度 d 取 3, 其他一些参数经调

试选取如下: $g_{\text{MIN}} = 0.5, g_{\text{MAX}} = 1.5, X = 1.0, R = 1.0, k = 5.0$.

在高度 $H = 0 \text{ km}$, 马赫数 $Ma = 0$ 处从稳态作 5% 的上阶跃, 跟踪一个给定的带宽为 5 的二阶参考模型输出, 仿真结果如图 1~ 图 4 所示.

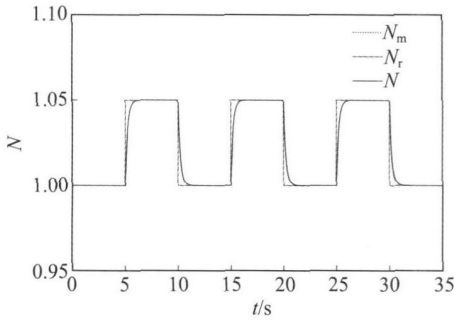


图 1 转速跟踪曲线 ($H=0 \text{ km}, Ma=0$)

Fig. 1 Rotor speed tracking curve ($H=0 \text{ km}, Ma=0$)

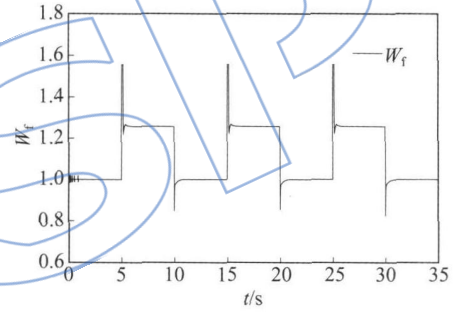


图 2 燃油变化曲线

Fig. 2 Main fuel flow rate curve

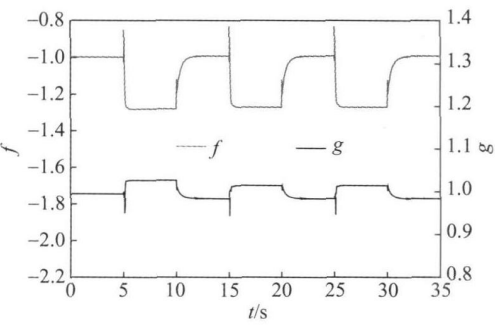


图 3 $\hat{f}(x_1, x_2)$ 和 $\hat{g}(x_1, x_2)$ 的变化曲线

Fig. 3 $\hat{f}(x_1, x_2)$ and $\hat{g}(x_1, x_2)$ curve

图 1 中 N_r 为阶跃指令, N_m 为要跟踪的参考模型轨迹, N 为实际高压转速. 由图 1 和图 4 所示转速跟踪迅速平稳, 误差收敛快. 在包线内点 ($H = 13 \text{ km}, Ma = 1.7$) 处作和地面点处相同的仿真, 控制效果良好 (见图 5). 包线内其他点作相同仿真都得到类似的结果, 限于篇幅, 不再给出.

图 6 是几种不同控制方案在转速作 5% 上阶跃时的比较. N_m 为要跟踪的轨迹, N_i 采用对控制

增益项用神经网络估计的反步法控制方案, N_2 采用假定控制增益为已知常数的反步法控制方案, N_3 采用模型参考自适应控制方案(MRAC). 可见 N_1 效果最好, 改善了瞬态性能, 并且反应迅速, 能很快与 N_m 贴合; N_2 也能够改善瞬态性能, 但是跟踪稍慢; N_3 作为一种线性系统控制方法虽然能够渐进稳定, 但是过渡过程品质不佳, 速度最慢.

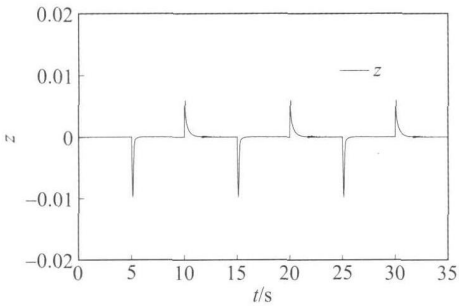


图 4 转速跟踪误差变化曲线

Fig. 4 Rotor speed tracking error curve

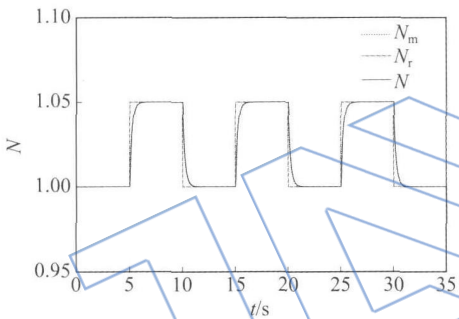


图 5 转速跟踪曲线 ($H=13\text{ km}, Ma=1.7$)

Fig. 5 Rotor speed tracking curve

($H=13\text{ km}, Ma=1.7$)

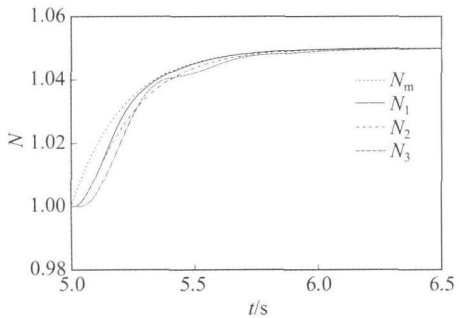


图 6 几种控制方案的比较

Fig. 6 Comparison of several control schemes

4 结 论

本文主要研究了神经网络反步控制方法在航空发动机控制中的应用, 并用一种改进的切换逻辑避免了控制器奇异问题. 与以前方法相比, 该方法避免了对虚拟控制的反复求导, 控制器结构更

为简洁. 最后针对某型涡扇发动机非线性模型设计了控制律, 从仿真结果可以看出, 系统的瞬态性能得到了有效改善, 并具有较好的鲁棒性, 且控制律简单易用, 便于工程实现.

参考文献:

[1] 董文瀚, 孙秀霞, 林岩. 反推自适应控制的发展及应用[J]. 控制与决策, 2006, 21(10): 10821086.
DONG Wenhan, SUN Xiuxia, LIN Yan. Adaptive back2 stepping control: development and Applications[J]. Con2 trol and Decision, 2006, 21(10): 10821086. (in Chinese)
[2] 张海波, 孙健国, 孙丰诚. 非线性反演控制律在航空发动机多变量控制中的应用[J]. 航空动力学报, 2007, 22(7): 119021194.
ZHANG Haibo, SUN Jianguo, SUN Fengcheng. Applica2 tions of nonlinear back stepping control strategy in multiva2 ria2ble control of aeroengine[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(7): 119021194. (in Chinese)
[3] 黄金泉, 蔡红武. 飞行/推进系统自适应神经网络综合控制仿真研究[J]. 航空学报, 2002, 23(4): 364367.
HUANG Jinquan, CAI Hongwu. Simulation study of a2 daptive neural network control for integrated flight/ pr2 pulsion systems[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2002, 23(4): 364367. (in Chinese)
[4] 张鹏, 黄金泉. 航空发动机神经网络内模控制[J]. 航空动力学报, 2005, 20(6): 10621065.
ZHANG Peng, HUANG Jinquan. Application of internal model control system based on neural network in aer2 Engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(6): 10621065. (in Chinese)
[5] LI Yahui, SHENG Qiang, ZHUANG Xianyi, et al. Ro2 bust and adaptive back stepping contrl for non2linear sys2 tems using RBF neural networks[J]. IEEE Neural Net2 works, 2004, 15(3): 692701.
[6] Lee Chinghung, Chung Boren, CHANG Fukai, et al. A2 daptive backstepping control for a class of non2linear un2 certain systems using fuzzy neural networks[C]//Proceed2 ings of the 6th International Conference on Machine Learning and Cybernetics. Hongkong: [s. n.], 2007: 4312436.
[7] Huang J T, CHEN Yenming. A smooth switching adap2 tive controller for linearizable systems with improved tran2 sient performance[J]. International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, 2006, 20(9): 432446.
[8] Huang J T. Singularity2free adaptive backstepping design for stric2feedback systems using neural networks[C]// Proceedings of the 6th International Conference on Ma2 chine Learning and Cybernetics. Hongkong: [s. n.], 2007: 27522765.
[9] Narendra K S, Annaswamy A M. A new adaptive law for ro2 bustadaptation without persistent excitation [J]. IEEE Trans. Automal. Control, 1987, 32(1): 1342145.