冗余直接驱动阀系统的余度控制策略

蔚永强 郭 宏 谢占明

(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100191)

摘 要: 针对冗余直接驱动阀伺服系统中由于余度降级所造成的性能降低问题, 提出一种神经网络自适应滑模余度控制策略. 利用径向基函数神经网络 RBFNN (Radial Basis Function Neural Network) 的在线学习功能, 对系统发生的变化进行快速自适应补偿, 使系统状态趋近于滑模面, 提高跟踪精度和鲁棒性; 并通过与比例微分 PD (Proportional-Derivative) 算法的并行控制, 促进 RBFNN 的收敛, 增强系统的稳定性. 通过与 PID (Proportional-Integral-Derivative) 切换控制策略的对比研究, 表明 RBFNN 自适应滑模余度控制方法不但设计简单, 而且能够有效克服余度降级带来的系统性能下降的问题, 极大地改善了系统的品质.

关 键 词: 直接驱动阀 (DDV); 余度控制; 神经网络; 滑模; 并行控制

中图分类号: TM 921

文献标识码: A 文章编号: 1001-5965(2008)08-0869-04

Redundancy control of direct-drive-valve servo system

Yu Yongqiang Guo Hong Xie Zhanming

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract A novel neural network adaptive sliding mode control strategy was proposed, which was applied to ensure tracking capability to direct-drive-valve (DDV) servo system in the presence of degrading redundancy. A radial basis function neural network (RBFNN) was adopted to realize sliding mode control. By means of compensating varieties of the system with adaptive learning algorithm, the control based on RBFNN decreased the tracking error and enhanced the robustness. Meanwhile, a proportional-derivative (PD) controller was designed as the other parallel control part, which improved the convergence of RBFNN, and enhanced the stability of system. Simulation results show that the proposed control scheme solves the problems brought by the degrading of redundancy effectively. It possesses better tracking performance than switching proportional-integral-derivative (PID) control, and can be designed easily.

Key words: direct-drive-valve(DDV); redundancy control; neural network; sliding mode; parallel control

直接驱动阀 DDV (Direct-Drive-Valve)伺服系统是机载作动系统的重要组成部分[1-2], 因而对其控制特性和可靠性有着很高的要求. 为保障系统的可靠性, 通常采用冗余技术[3-5], 这必然带来一些新的问题, 如系统在余度降级过程中会有故障瞬态现象, 系统在余度降级后会有性能降低. 本文针对已研制的冗余 DDV 伺服系统[6], 提出一种神经网络自适应滑模余度控制策略, 以克服余度降级带来的系统性能下降的问题.

1 系统数学模型

本文中冗余 DDV 伺服系统采用电气三余度结构形式, 借助比较监控和自监控手段可以有效地监测隔离一次故障、二次故障, 从而实现二次故障 / 工作. 该系统中, 直接驱动转阀阀芯的永磁无刷直流力矩电机采用同轴串联式三余度结构, 各余度直接通过电机转轴实现力矩综合. 三个通道电机的结构及电气特性完全相同. 电机轴与转阀

收稿日期: 2007-07-30

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目 (NCET-04-0163)

作者简介: 蔚永强 (1980-), 男, 陕西西安人, 博士生, yongqiangyu@asee.buaa.edu.cn

阀芯为同轴刚性联接,电机转角和阀芯转角相同.忽略电机换相期间相绕组电流变化的过渡过程,则冗余 DDV 系统的动态模型可表示为

$$u = Ri + L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} + C_e\omega \tag{1}$$

$$NK_m i = J\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} + B\omega + T_l \tag{2}$$

$$\theta = \int \omega \mathrm{d}t \tag{3}$$

其中 $N = \begin{cases} 3\text{三余度,即三通道同时工作} \\ 2\text{双余度,即双通道同时工作} \\ 1\text{单余度,即单通道工作} \end{cases}$

式中,J 为系统总的转动惯量,包括电机转子的转动惯量和转阀阀芯的转动惯量;B 为系统总的粘滞阻尼系数;N 为余度状态值;θ 为电机转角,即阀芯转角;ω 为电机的机械角速度;K_m 为单通道电机的电磁转矩系数;C_e 为反电势系数;R 为电枢相电阻;L 为电枢相电感;i 为等效电枢电流;u 为等效控制输入电压;T_l 为液动力矩.

由于系统中电枢回路电磁时间常数远小于机电时间常数,可忽略 L 的作用,取状态变量 $\boldsymbol{X} = [x_1, x_2]^{\mathrm{T}} = [\theta, \dot{\theta}]^{\mathrm{T}}$,可得系统状态方程为

$$\left.\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -fx_2 + gu(t) - d \end{aligned}\right\} \tag{4}$$

式中,$f = \dfrac{NK_mC_e}{JR} + \dfrac{B}{J}$;$g = \dfrac{NK_m}{JR}$;$d = \dfrac{T_l}{J}$.

2 系统余度控制方案

2.1 常规 PID 切换控制

定义系统的跟踪误差为

$$e = r - \theta \tag{5}$$

式中,r 为阀芯位置指令.

采用常规 PID(Proportional-Integral-Derivative)控制器时,其控制算法为

$$u = K_p e + K_i \int e\mathrm{d}t + K_d\dot{e} \tag{6}$$

式中,K_p,K_i,K_d 分别为比例、积分、微分系数.

若常规 PID 控制器参数保持不变,则在相同负载状况下,当系统发生一次或二次故障时,将导致系统调节时间变长,频宽变窄,跟踪误差显著增大.为保障系统的控制性能,可预先整定好三套控制参数以对应三个余度等级;在余度降级的同时,进行 PID 控制参数的切换.然而实际 DDV 系统中包含饱和、摩擦和液动力负载等非线性环节,使得 PID 控制参数很难整定,而且系统在进行 PID 切换控制后也会存在一定程度的性能下降.

2.2 神经网络自适应滑模控制

为使系统的余度控制方法设计简单,本文提出一种神经网络自适应滑模余度控制策略.

1) RBFNN(Radial Basis Function Neural Network)的数学模型.神经网络能以任意精度逼近任意连续非线性函数,对复杂不确定问题具有自适应、自学习功能.RBFNN 运算量小、收敛速度快,其结构如图 1.RBFNN 模型可表示为

$$u_{nn} = \boldsymbol{W}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H} = \sum_{j=1}^{m} w_j h_j \tag{7}$$

式中,u_{nn} 为 RBFNN 的输出;$\boldsymbol{W} = [w_1, w_2, \cdots, w_m]^{\mathrm{T}}$ 为网络的权向量;$\boldsymbol{H} = [h_1, h_2, \cdots, h_m]^{\mathrm{T}}$ 为径向基函数向量;将高斯函数作为网络的基函数,则

$$h_j(\boldsymbol{Z}) = \exp[-\|\boldsymbol{Z} - C_j\|^2/(2b_j^2)]$$
$$j = 1, 2, \cdots, m \tag{8}$$

式中,$\boldsymbol{Z} = [z_1, z_2, \cdots, z_n]^{\mathrm{T}}$ 为输入向量;b_j 为第 j 个节点的基宽参数;$\boldsymbol{C}_j = [c_{j1}, c_{j2}, \cdots, c_{jn}]^{\mathrm{T}}$ 为第 j 个节点的中心向量;$\|\cdot\|$ 为欧氏范数.

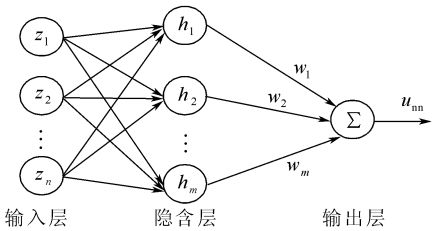


图 1 *RBFNN* 结构图

2) 基于 RBFNN 的滑模控制.设计滑模切换函数为

$$s(t) = ce(t) + \dot{e}(t) \tag{9}$$

适当选择滑动模态系数 c 值,使滑动模态具有良好的动态品质.本文将 s 作为神经网络的输入,即 $\boldsymbol{Z} = s$ 采用 RBFNN 对非线性负载以及余度降级所带来的系统的变化进行自适应补偿,以改善系统的余度控制性能.RBFNN 的目标就是使系统状态趋近于滑模面 $s = 0$,保证系统的稳定性和鲁棒性.因而网络权值的自适应寻优过程应基于全局滑模到达条件 $\dot{s}s < 0$[7].根据梯度下降法则,可得神经网络权值的学习算法为

$$\dot{w}_j = -\frac{\eta\partial s(t)\dot{s}(t)}{\partial w_j(t)} = -\eta\frac{\partial s(t)\dot{s}(t)}{\partial u(t)}\frac{\partial u(t)}{\partial w_j(t)} \tag{10}$$

式中,η 为学习速率,$\eta \in (0, 1)$.由于

$$\frac{\partial u(t)}{\partial w_j(t)} = \frac{\partial u_{nn}(t)}{\partial w_j(t)} = h_j(s) \tag{11}$$

$$\frac{\partial s(t)\dot{s}(t)}{\partial u(t)} = -gs(t) = -\frac{NK_m}{JR}s(t) \tag{12}$$

式(12)中 N 随着余度降级而发生变化,为了简化

计算, 用 $N=3$ 固定值来替代, 则式 (10) 可改写为

$$\dot{w}_j(t) = \eta\frac{3K_m}{JR}s(t)h_j(s) = \lambda s(t)h_j(s) \tag{13}$$

式中, λ 为常值, 且 $\lambda>0$.

3) PD (Proportional-Derivative) 并行控制. 基于 RBFNN 的滑模控制具有很强的自适应性以及鲁棒性, 但是神经网络参数迭代初值和学习速率的选取并无有效规则可寻, 具有很大的盲目性, 若选择不当, 就会导致学习过程不收敛甚至系统振荡现象. 尤其是在系统阶跃响应以及频率较高的正弦响应时, 初始阶段较大的 s 值极易造成神经网络的饱和, 使系统无法收敛. 本文引入 PD 并行控制, 以改善神经网络收敛过程, 增强系统稳定性. PD 控制器的输出为

$$u_{pd} = K_p e + K_d\dot{e} \tag{14}$$

式中, K_p, K_d 分别为比例、微分系数. 选取

$$K_p = cK_d \tag{15}$$

则式 (14) 可整理为

$$u_{pd} = K_d(ce+\dot{e}) = K_d s \tag{16}$$

则整个系统总的控制输入为

$$u = u_{nn} + u_{pd} \tag{17}$$

本文提出的系统总体控制结构如图 2所示.

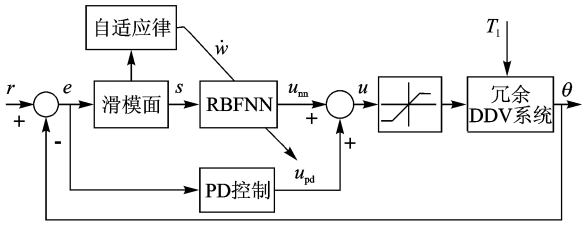


图 2　冗余 *DDV* 系统的神经网络自适应滑模控制结构图

4) 稳定性分析. 由于 RBFNN 能以任意精度逼近任意连续非线性函数, 本文采用 RBFNN 对非线性负载以及余度降级所带来的系统的变化进行自适应补偿, 使 RBFNN 逼近理想控制律:

$$u_\triangle = g^{-1}[\ddot{r} + c\dot{e} + f\dot{\theta} + d] \tag{18}$$

假设 RBFNN 的最优权向量 $\hat{\boldsymbol{W}}$ 满足:

$$|u_{nn}(s,\hat{\boldsymbol{W}}) - u_\triangle(s)| < \xi \tag{19}$$

其中, $u_{nn}(s,\hat{\boldsymbol{W}}) = \hat{\boldsymbol{W}}^T\boldsymbol{H}$. 选取 Lyapunov 函数为

$$V = \frac{1}{2}s^2 + \frac{g}{2\lambda}\tilde{\boldsymbol{W}}^T\tilde{\boldsymbol{W}} \tag{20}$$

其中, $\tilde{\boldsymbol{W}} = \hat{\boldsymbol{W}} - \boldsymbol{W}$ 为神经网络权值误差向量. 则

$$\dot{V} = s\dot{s} + \frac{g}{\lambda}\tilde{\boldsymbol{W}}^T\dot{\tilde{\boldsymbol{W}}} = s\dot{s} - \frac{g}{\lambda}(\hat{\boldsymbol{W}}^T - \boldsymbol{W}^T)\dot{\boldsymbol{W}} \tag{21}$$

由式 (4)、式 (9)、式 (16) 和式 (18) 可得

$$\dot{s} = c\dot{e} + \ddot{r} + f\dot{\theta} - g(u_{nn} + u_{pd}) + d = g(u_\triangle - \hat{\boldsymbol{W}}^T\boldsymbol{H} - sK_d) \tag{22}$$

将式 (13) 和式 (22) 代入式 (21), 整理得

$$\dot{V} = -s^2gK_d + sg(u_\triangle - \boldsymbol{W}^T\boldsymbol{H}) - sg(\hat{\boldsymbol{W}}^T - \boldsymbol{W}^T)\boldsymbol{H} = -s^2gK_d + sg(u_\triangle - \hat{\boldsymbol{W}}^T\boldsymbol{H}) \tag{23}$$

由于 $g>0$, 并根据式 (19) 可得

$$\dot{V} \leqslant |s|g(-K_d|s| + \xi) \tag{24}$$

则当 $|s|>\xi/K_d$ 时, $\dot{V}<0$. 由于 ξ 很小, 可见 s 将逐渐收敛到滑模面的一个很小的边界层内, 因而系统是稳定的. 同时可以看出通过引入 PD 并行控制, 增强了系统的稳定性.

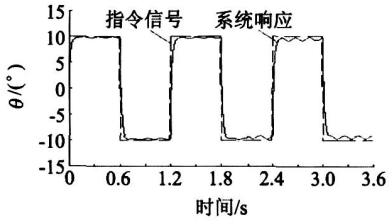
3　仿真分析

系统参数为: $J=1.2\times10^{-3}$ kg·m^2, $K_m=0.29$ N·m/A, $C_e=0.145$ V·s/rad, $R=1\,\Omega$, $B=0.04$ N·m·s/rad, 阀芯转角为 $|\theta|\leqslant0.35$ rad, 控制电压范围为 $|u|\leqslant15$ V. 同时, 系统中非线性时变的液动力负载近似取为 $T_l=5\theta|\sin(6\pi t)|$.

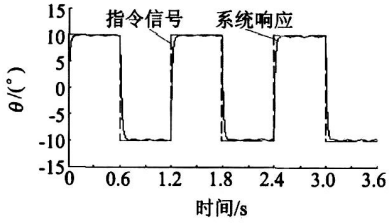
利用 Matlab 软件分别采用常规 PID 控制、PID 切换控制以及本文提出的余度控制策略对该冗余 DDV 系统进行仿真, 各控制策略的参数分别设置为: ①PID 控制时, $K_p=160$, $K_i=33.3$, $K_d=2.7$; ②PID 切换控制策略中, 三余度时 $K_p=160$, $K_i=33.3$, $K_d=2.7$; 双余度时 $K_p=260$, $K_i=33.3$, $K_d=3.6$; 单余度时 $K_p=400$, $K_t=33.3$, $K_d=5.4$; ③本文提出的神经网络自适应滑模控制策略中, $c=200$, RBFNN 采用 1-6-1 结构, 神经网络初始权值 $W(0)=[0,0,0,0,0,0]^T$, 并行 PD 控制器参数为 $K_p=60$, $K_d=0.3$.

当系统发生故障时, 不同控制策略下系统的方波响应曲线如图 3所示. 系统在 0.9 s时由三余度降级为双余度, 在 2.1 s时降级为单余度. 可见, 采用 PID 切换控制策略的余度控制性能较常规 PID 控制有了明显的改善, 但系统在余度降级后出现一定程度的性能下降; 本文提出的控制策略则体现出很强的自适应性和鲁棒性, 有效地克服了余度降级带来的系统性能下降的问题, 并且极大的提高了系统的跟踪精度.

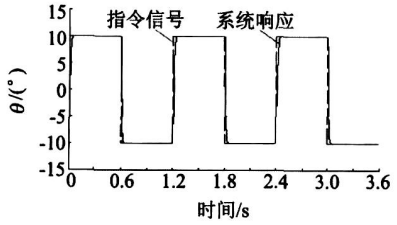
系统余度降级时的正弦响应结果如图 4 其中, 正弦输入指令为 $r=(\pi/18)\sin(10\pi t)$ rad, 在 0.6 s时系统由三余度降级为双余度, 在 1.2 s时降级为单余度. 图 4c为控制量曲线, 包括 RBFNN 的输出 u_{nn} 和并行 PD 控制器的输出 u_{pd}. 从图中可见, 初始阶段 PD 控制器起主要作用; RBFNN 通



a 采用常规 PID 控制

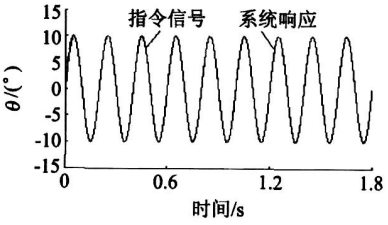


b 采用 PID 切换控制

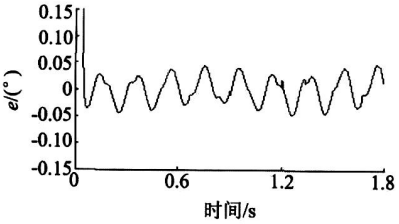


c 采用本文提出的余度控制策略

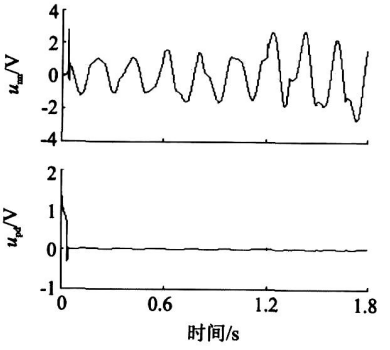
图 3 系统方波响应曲线



a 系统输出响应曲线



b 误差放大曲线



c 控制量曲线

图 4 采用本文提出的余度控制策略时系统的正弦响应

过不断学习,逐渐替代了 PD 控制器,成为闭环回路的主控制器. 当余度降级发生时,由于 u_{nn}对系统的变化进行了快速的自适应补偿,从而避免了跟踪误差的增大,保证了系统良好的动态跟随性能和鲁棒性.

4 结束语

本文提出一种神经网络自适应滑模余度控制策略,应用于冗余 DDV 伺服系统. 利用 RBFNN 在线学习功能,对系统发生的变化进行快速自适应补偿,使系统状态趋近于滑模面,提高跟踪精度和鲁棒性;并通过与 PD控制器的并行控制,改善神经网络的收敛,增强系统的稳定性. 研究结果表明,该余度控制方法能够有效克服余度降级带来的系统性能下降的问题,明显改善系统的品质;并且设计简单,不需要针对系统发生的故障进行相应的控制参数或控制结构的切换.

参考文献 (References)

[1] 夏立群,张新国. 直接驱动阀式伺服作动器研究[J]. 西北工业大学学报, 2006, 24(3): 308-312
Xia Liqun, Zhang Xinguo. Development of DDV (Direct Drive Valve) servo actuator[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2006, 24(3): 308-312 (in Chinese)

[2] Lin J S, Chen C L. Buck/boost servo amplifier for direct-drive-valve actuation[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1995, 31(3): 960-967

[3] Vieten K W, Snyder J D, Clark R P. Redundancy management concepts for advanced actuation systems[R]. AIAA-93-1168, 1993

[4] 付永领,裴忠才,王占林. 伺服作动系统的余度控制[J]. 北京航空航天大学学报, 1999, 25(5): 531-534
Fu Yongling, Pei Zhongcai, Wang Zhanlin. Redundance control of servo actuator system[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1999, 25(5): 531-534 (in Chinese)

[5] 叶宏,曾广商. 三余度数字伺服控制系统建模与动静态特性研究[J]. 固体火箭技术, 2003, 26(1): 71-75
Ye Hong, Zeng Guangshang. Modeling and analysis of static and dynamic characteristics of triplex redundance digital servo control system[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2003, 26(1): 71-75 (in Chinese)

[6] 郭宏,蔚永强,邢伟. 三余度直接驱动阀驱动控制系统[J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(11): 1286-1290
Guo Hong, Yu Yongqiang, Xing Wei. Triplex-redundancy control system for direct-drive valve[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(11): 1286-1290 (in Chinese)

[7] Huang S J, Huang K S, Chiou K C. Development and application of a novel radial basis function sliding mode controller[J]. Mechatronics, 2003, 13: 313-329

(责任编辑: 刘登敏)