

采用神经网络滑模控制的齿隙摩擦补偿

张大兴, 贾建援, 郭永献

(西安电子科技大学机电工程学院 西安 710071)

【摘要】基于滞环齿隙模型和集合摩擦模型,建立了齿轮传动系统动力学变结构模型。采用径向基函数(RBF)神经网络和滑模控制构成复合控制器,对系统齿隙、摩擦非线性因素进行了补偿。利用RBF神经网络调节滑模控制器的切换项增益,降低了滑模控制的抖振,提高了补偿效果,仿真结果验证了该方法的可行性。

关键词 齿隙; 补偿; 摩擦; RBF神经网络; 滑模控制
中图分类号 TP273+.3 **文献标识码** A

Neural Network Sliding Mode Control Approach to Backlash and Friction Compensation

ZHANG Da-xing, JIA Jian-yuan, and GUO Yong-xian

(School of Mechano-Electronic Engineering, Xidian University Xi'an 710071)

Abstract A variable structure dynamic model of gear driving system is established based on backlash hysteresis model and friction aggregation model. The influence of backlash and friction is compensated based on a compound controller formed by radial basis function (RBF) neural network and sliding mode. The switching plus of sliding mode controller can be adjusted by RBF neural network, which can reduce the buffeting of sliding mode control. The feasibility of this method is validated by simulation results.

Key words backlash; compensation; friction; RBF neural network; sliding mode control

齿轮传动系统中普遍存在的齿隙、摩擦等非线性因素导致的死区误差、低速爬行、极限环振荡等现象,是制约运动控制精度提高的重要原因,目前主要采取补偿的方法减小其影响。但是由于该类现象的不可微性和非线性,使其补偿方法的研究非常困难。从经典的PID方法,到模糊控制、自适应控制、神经网络控制、变结构控制等^[1-7],还没有普遍适应的补偿方法。

滑模变结构控制由于对系统参数变化和外部扰动具有强壮的鲁棒性,成为解决非线性系统控制问题的一种有效方法,但是滑模控制不可避免的抖振问题是其在实际系统中应用的突出障碍^[8-9]。RBF神经网络是一种三层前向局部逼近网络,虽然其输入到输出的映射是非线性的,但是其隐含空间到输出空间的映射是线性的,所以可以大大加快学习速度并避免局部极小问题,已证明它能以任意精度逼近任意连续函数。利用各自优点组成的RBF神经网络和滑模控制复合控制器,有广泛的应用前景^[10-11]。

本文基于文献[1-2]的齿隙、摩擦模型,建立了齿轮传动系统动力学变结构模型。采用RBF神经网络调节滑模控制器的切换项增益,降低了滑模控制的抖振,对传动系统的齿隙、摩擦非线性因素进行了有效补偿,仿真结果验证了该方法的可行性。

1 系统描述与建模

通用的齿轮传动系统可以简化为如图1所示的转子定轴转动模型。

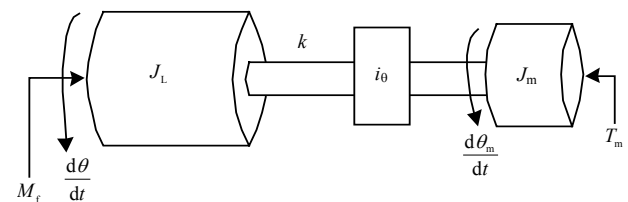


图1 传动系统简化模型

图中 M_f 为负载所受摩擦力矩; T_m 为电机额定转矩; J_L 为负载转动惯量; J_m 为电机转子惯量(包括电机轴小齿轮及可能的联轴器); k 为转轴刚度, i_0

收稿日期: 2007-04-27; 修回日期: 2007-09-15

基金项目: 国家自然科学基金(10476019)

作者简介: 张大兴(1978-), 男, 博士生, 主要从事机电传动系统智能控制方面的研究。

为传动比; $d\theta/dt$ 、 $d\theta_m/dt$ 分别为负载和电机转速。忽略电机转子摩擦, 可得系统含摩擦力矩的最简机电动力学方程组为:

$$\begin{cases} J_L \frac{d^2\theta}{dt^2} - M_f + k(\theta - \frac{\theta_m}{i_0}) = 0 \\ J_m \frac{d^2\theta_m}{dt^2} + \frac{k}{i_0^2}(\theta_m - i_0\theta) = c_\varphi i \\ L \frac{di}{dt} + c_\varphi \frac{d\theta_m}{dt} + Ri = U \end{cases} \quad (1)$$

式中 θ 、 θ_m 分别为负载和电机转角; $d^2\theta/dt^2$ 、 $d^2\theta_m/dt^2$ 分别为负载和电机加速度; c_φ 为电机电枢阻尼系数; i 为电机电枢电流; L 为电枢电感; R 为电枢内阻; U 为电枢两端电压。

由于齿隙、摩擦的非线性本质, 始终无法建立两者准确的动力学模型。目前较为准确的摩擦模型是同时考虑静摩擦、库仑摩擦、粘滞摩擦及Stribeck摩擦的集合模型。参考文献[2], 传动系统摩擦力 $F(x, u)$ 可表示为:

$$F(x, u) = F_{\text{slip}} \left(\frac{dx}{dt} \right) \left[\lambda \left(\frac{dx}{dt} \right) \right] + F_{\text{stick}}(u) \left[1 - \lambda \left(\frac{dx}{dt} \right) \right] \quad (2)$$

式中 $\lambda(dx/dt)$ 为设置的动静摩擦之间切换的临界速度; $F_{\text{stick}}(u)$ 、 $F_{\text{slip}}(dx/dt)$ 分别表示静摩擦力和动摩擦力, 其具体表达式在文献[2]中有详细解释, 在此不再赘述。

典型的齿隙模型是滞环模型, 参考文献[1], 传动比为1时, 齿隙滞环模型为:

$$\frac{d\theta(t)}{dt} = \begin{cases} \frac{d\theta_m(t)}{dt} & \frac{d\theta_m(t)}{dt} > 0 \ \& \ \theta(t) = \theta_m(t) - \varepsilon \\ \frac{d\theta_m(t)}{dt} & \frac{d\theta_m(t)}{dt} < 0 \ \& \ \theta(t) = \theta_m(t) + \varepsilon \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

式中 ε 为齿隙宽度; $\theta(t)$ 、 $\theta_m(t)$ 为负载和电机转角。采用上述齿隙、摩擦模型, 引入变结构参数 ξ 和 ζ , 系统机电动力学方程为:

$$\begin{cases} J_L \frac{d^2\theta}{dt^2} - \zeta M_f + \zeta \xi k(\theta + \varepsilon_0 - \frac{\theta_m}{i_0}) = 0 \\ J_m \frac{d^2\theta_m}{dt^2} + \frac{\xi k}{i_0^2}(\theta_m - i_0(\theta + \varepsilon_0)) = c_\varphi i \\ L \frac{di}{dt} + c_\varphi \frac{d\theta_m}{dt} + Ri = U \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{式中 } \varepsilon_0 = \begin{cases} \varepsilon^+ & \frac{d\theta_m(t)}{dt} \geq 0 \\ \varepsilon^- & \frac{d\theta_m(t)}{dt} < 0 \end{cases}; \text{ 齿隙宽度 } \varepsilon = \varepsilon^+ - \varepsilon^-;$$

参数 ξ 和 ζ 按以下条件变化:

$$\xi = \begin{cases} 1 & \frac{d\theta_m(t)}{dt} \neq 0 \ \& \ \theta(t) = \frac{\theta_m(t)}{i_0} - \varepsilon_0 \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

$$\zeta = \begin{cases} 1 & \frac{d\theta(t)}{dt} \neq 0 \\ 0 & \frac{d\theta(t)}{dt} = 0 \end{cases}$$

2 控制器设计

忽略电机电感和转子质量, 基于式(4), 可得

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{\zeta}{J_L} M_f + \frac{\zeta i_0 c_\varphi}{J_L R} U - \frac{\zeta i_0^2 c_\varphi^2}{J_L R} \frac{d\theta}{dt} \quad (5)$$

令 $g = \frac{\zeta i_0 c_\varphi}{J_L R}$, $f = \frac{\zeta}{J_L} M_f - \frac{\zeta i_0^2 c_\varphi^2}{J_L R} \frac{d\theta}{dt}$, 定义系统误差 $e = \theta - \theta_q$, 设计滑模切换函数 $s = ce + \frac{de}{dt}$ ($c > 0$),

由此可得:

$$\frac{ds}{dt} = c \frac{de}{dt} + \frac{d^2e}{dt^2} = c \frac{de}{dt} + f + gU - \frac{d^2\theta_q}{dt^2} \quad (6)$$

系统控制目标是 $ds/dt = 0$, 设 \tilde{f} 、 \tilde{g} 分别为 f 、 g 的理想值, 可得系统理想控制器为:

$$U_q = \tilde{g}^{-1} \tilde{U} \quad (7)$$

设计系统切换控制器 $U_n = -\tilde{g}^{-1} K \text{sign}(s)$, 则系统总控制器为:

$$U = U_n + U_q \quad (8)$$

式中 $\tilde{U} = \frac{d^2\theta_q}{dt^2} - \tilde{f} - c \frac{de}{dt}$; K 为切换项增益。

为了减小滑模控制的抖振, 采用RBF神经网络来调节切换项的增益 K 。设RBF网络输入 $x = \left[s \frac{ds}{dt} \right]$, 输出的绝对值为增益 K , 则有:

$$K = |w^T h(x)| \quad (9)$$

式中 w^T 为RBF神经网络的权值; $h(x)$ 为高斯函数。网络结构取2-3-1, 则有:

$$h_i(x) = \exp \left(-\frac{\|x - c_i\|^2}{2b_i^2} \right) \quad i = 1, 2, 3 \quad (10)$$

式中 c_i 为第 i 个神经元的中心位置; b_i 为第 i 个神经元的宽度。网络权值调整指标 $E = e^2/2$, 则权值学习算法为:

$$\Delta w = -\eta \frac{\partial E}{\partial w} = -\eta e \frac{\partial e}{\partial w} \approx -\eta e \frac{\partial e}{\partial U} \frac{\partial U}{\partial K} \frac{\partial K}{\partial w} \quad (11)$$

由于 $\frac{\partial e}{\partial U}$ 值的大小可以通过权值来补偿, 因此其数值只与其符号有关。设计系统误差 e 的符号与控制电压 U 的符号相同, 由此可得:

$$\frac{\partial e}{\partial U} = \text{sign}\left(\frac{\partial e}{\partial U}\right) = 1 \quad (12)$$

由式(7)~式(9)可得 $\frac{\partial U}{\partial K} = -\tilde{g} - \text{sign}(s)$, $\frac{\partial K}{\partial w} =$

$h(x)\text{sign}(w^T h(x))$, 由上述分析可得网络权值调整算法为:

$$\Delta w(t) \approx -\eta e(-\tilde{g}^{-1})\text{sign}(s)h(x)\text{sign}(w^T h(x)) \quad (13)$$

网络权值学习算法为:

$$w(t) = w(t-1) + \Delta w(t) + \beta(w(t) - w(t-1)) \quad (14)$$

式中 η 、 β 分别为网络学习速率和惯性量系数, 且 $\eta \in (0,1)$, $\beta \in (0,1)$ 。

3 仿真与结果分析

系统主要仿真参数如表1所示, 系统输入为 $1\sin(4\pi/7t)$ 的正弦信号, 外界干扰为 $0.1\sin(2\pi t)$ 的正弦信号。系统仿真结果如图2~图5所示。

表1 系统主要仿真参数

参数	$J_l/\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$	$k/\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$	i_0
数值	1	$5e^4$	71
参数	$J_m/\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$	ρ/m	η
数值	$1.19e^{-5}$	$3e^{-3}$	0.8
参数	L/H	R/Ω	β
数值	$8e^{-5}$	0.4	0.07

比较RBF神经网络滑模复合控制以及固定增益滑模控制仿真结果可见, 采用RBF神经网络滑模复合控制不仅提高了传动系统的控制精度, 而且降低了滑模控制的抖振现象, 降低了工程中对控制器性能的要求。

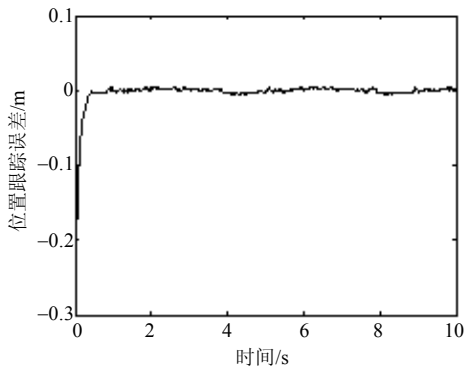


图2 复合控制位置跟踪误差

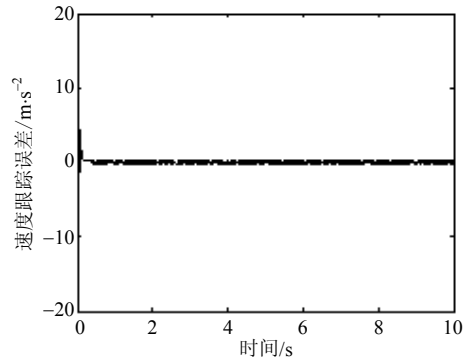


图3 复合控制速度跟踪误差

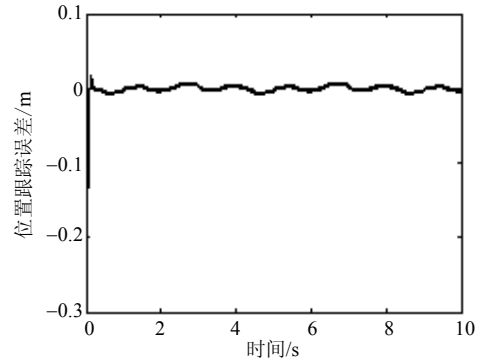


图4 固定增益滑模控制位置跟踪误差

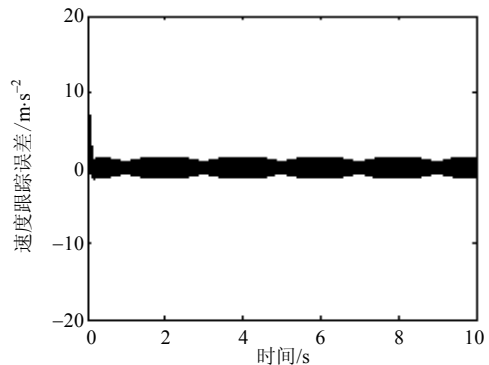


图5 固定增益滑模控制速度跟踪误差

4 结束语

为了减小齿隙、摩擦等非线性因素的影响, 提高传动系统运动控制精度, 本文在滞环齿隙模型和集合摩擦模型基础上, 建立了考虑齿隙、摩擦影响的典型齿轮传动系统变结构动力学模型。采用RBF神经网络滑模控制方法对齿轮传动系统中的齿隙、摩擦非线性因素进行了补偿, 在提高了控制精度的同时, 降低了滑模控制的抖振现象, 从而降低了工程中对控制器性能的要求。虽然仿真结果验证了该方法的可行性, 但是其有效性还有待于进一步实验验证。

参 考 文 献

[1] NORDIN M, GUTMAN P-O. Controlling mechanical

- systems with backlash—a survey[J]. *Automatica*, 2002, 38: 1633-1649.
- [2] SURANENI S, KAR I N, MURTHY O V R, et al. Adaptive stick-slip friction and backlash compensation using dynamic fuzzy logic system[J]. *Applied Soft Computing*, 2005, 6: 26-37.
- [3] LIU G, GOLDENBERG A A, ZHANG Y. Precise slow motion control of a direct-drive robot arm with velocity estimation and friction compensation[J]. *Mechatronics*, 2004, 14: 821-834.
- [4] SELMIC R R, LEWIS F L. Neural net backlash compensation with Hebbian tuning using dynamic inversion[J]. *Automatica*, 2001, 37: 1269-1277.
- [5] GARAGIC D, SRINIVASAN K. Adaptive friction compensation for precision machine tool drive[J]. *Control Engineering Practice*, 2004, 12: 1451-1464.
- [6] WANG Ying, ZHEN Hua-xiong, HAN Ding. Robust controller based on friction compensation and disturbance observer for a motion platform driven by a linear motor[J]. *J Systems and Control Engineering*, 2006, 220: 33-39.
- [7] YAN Jun-juh, SHYU Kuo-kai, LIN Jui-sheng. Adaptive variable structure control for uncertain chaotic systems containing dead-zone nonlinearity[J]. *Chaos, Solitons and Fractals*, 2005, 25: 347-355.
- [8] INNOCENT M, GRECO L, POLLINI L. Sliding mode control for two-time scale systems: stability issues[J]. *Automatica*, 2003, 39: 273-280.
- [9] CHU Wen-hou, TUNG Pi-cheng. Development of an automatic arc welding system using a sliding mode control[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2005, 45: 933-939.
- [10] 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.
- [11] LIN F J, WAI R J. Sliding-mode-controlled slider-crank mechanism with fuzzy neural network[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2001, 48(1): 60-70.

编辑 漆蓉

(上接第732页)

参 考 文 献

- [1] 刘盛纲, 蒙林, 熊彩东. 高功率微波[J]. *电子科技大学学报*, 1996, 22(1): 25-27.
LIU Sheng-gang, MEN Lin, XIONG Cai-dong. High power microwave[J]. *Journal of Electronic Science and Technology of China*, 1996, 22(1): 25-27.
- [2] 刘盛纲, 于善夫, 刘秀红. 静电电子回旋脉塞与静电自由电子激光[J]. *强激光与粒子束*, 1989, 1(2): 100-117.
LIU Sheng-gang, YU Shan-fu, LIU Xiu-hong. Electrostatic electron cyclotron resonance maser and electrostatic free electron laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1989, 1(2): 100-117.
- [3] 吴坚强, 熊彩东, 刘盛纲. 介质切伦可夫脉塞的研究[J]. *应用科学学报*, 1996, 14(3): 345-353.
WU Jian-qiang, XIONG Cai-dong, LIU Sheng-gang. Study of dielectric Cherenkov maser[J]. *Journal of Applied Science*, 1996, 14(3): 345-353.
- [4] 刘盛纲. 微波电子学导论[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985.
LIU Sheng-gang. Introduction of microwave electronics[M]. Beijing: Defense Industry Press, 1985.
- [5] 杨建华, 张亚洲, 舒挺. 低磁场谐振腔切伦科夫振荡器锥形放大器的初步实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2005, 17(5): 734-736.
YANG Jian-hua, ZHANG Ya-zhou, SHU Ting. Primary experimental study of resonator Cherenkov oscillator tapered amplifier tube operated at low magnetic field[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(5): 734-736.
- [6] 张军, 钟辉煌, 杨建华. 具有谐振腔的多波切伦科夫振荡器的粒子模拟[J]. *强激光与粒子束*, 2003, 15(1): 86-88.
ZHANG Jun, ZHONG Hui-huang, YANG Jian-hua. Particle simulation of the multiwave Cherenkov generator with a resonant cavity operation at low magnetic field[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, 15(1): 86-88.
- [7] 吴坚强, 王海明. 电磁波在非均匀等离子体波导中的传播[J]. *电子科技大学学报*, 2001, 30(4): 402-406.
WU Jian-qiang, WANG Hai-ming. Propagation of electromagnetic wave along waveguide filled with inhomogeneously plasma[J]. *Journal of Electronic Science and Technology of China*, 2001, 30(4): 402-406.
- [8] 张克潜, 李德杰. 微波与光电子学中的电磁理论[M]. 北京: 电子工业出版社, 2001.
ZHANG Ke-qian, LI De-jie. Electromagnetic theory for microwaves and optoelectronics[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2001.
- [9] Goplen B. Magic user's manual[M]. Washington D C: Seminar on Magic, 1997.

编辑 税红