自动离合器位置跟踪神经元自适应 PID控制

谢先平， 王旭东， 吴晓刚， 余腾伟
(哈尔滨理工大学电气与电子工程学院，黑龙江 哈尔滨，150040)

摘 要：针对自动离合器位置难以准确快速跟踪控制的问题，在采用蜗卷弹簧作为补偿装置改善驱动机构性能基础上，设计了一种具有前馈作用的增益可调神经元自适应 PID控制器，利用前馈控制加快控制器的响应速度，利用神经元的自学习功能实现权值的自动调整，采用 PSD算法实现增益的自动调整。实验结果表明，与常规控制器相比，该控制器用于离合器位置跟踪控制动、静态误差小，能够适应离合器负荷和目标接合速度的非线性变化，具有较好的鲁棒性，能够满足离合器位置跟踪控制要求。

关键词：神经元；自动离合器；位置跟踪；自适应 PID控制
中图分类号：TM921.54 **文献标识码**：A **文章编号**：1007-449X(2008)05-0555-06

Neuron adaptive PID control for position tracking control of automatic clutch

XIE Xian-ping, WANG Xu-dong, WU Xiao-gang, YU Teng-wei
(School of Electrical & Electronic Engineering, Harbin University of Science & Technology, Harbin 150040, China)

Abstract: Accurate and quick position tracking of automatic clutch is difficult on account of its nonlinear character. A new clutch actuating mechanism with a whirl spring was devised for torque compensation to reduce the load of DC actuator and improve the dynamic performance of system firstly, then a neuron adaptive PID controller with feedforward and adjustable gain was designed. The feedforward control was able to accelerate the response of controller, and the weight of neuron was adaptively adjusted by self-study function, and PSD algorithm was proposed to adjust its gain. The experiment results show that with the controller the position tracking error is smaller than common controller; and the controller can adapt to the nonlinear change of clutch load and target engaging speed, so it has good robustness and can meet the demand of position tracking control.

Key words: neurons; automatic clutch; position tracking; self-adaptive PID control

1 引 言

机械自动变速器 (AMT)结构简单，成本低，效率高，对手动变速器的改动小，特别适合于手动变速器的升级改造。离合器自动控制是 AMT的重点和难点。自动离合器驱动形式主要有气动、液动和电动式，电机驱动式结构简单，成本低，可控性好，动作响应迅速，受环境变化影响小，逐渐成为首选的驱动

收稿日期：2007-12-12
基金项目：国家科技攻关项目 (2003B435C)
作者简介：谢先平 (1980-)，男，博士研究生，主要研究方向为汽车电子控制；
王旭东 (1958-)，男，教授，博士生导师，主要研究方向为汽车电子控制与电机驱动控制；
吴晓刚 (1980-)，男，博士研究生，主要研究方向为汽车电子控制；
余腾伟 (1981-)，女，博士研究生，主要研究方向为汽车电子控制。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

形式,因而本文采用的也是电机驱动式。自动离合器的控制难点在于:①由于起步工况和驾驶意图复杂多变,离合器接合控制目标存在矛盾性,难以制订简单、高效、适应性强的控制策略;②离合器和电机特性均存在严重的非线性,离合器目标接合位置准确跟踪比较困难[1]。离合器位置的准确跟踪是实现自动离合器的基础和前提,它是一个非线性控制问题,系统参数变化大,要求控制系统具有良好的适应性和控制精度,常规控制方法难以实现这一目标[2]。滑模变结构控制能够根据系统状态偏离切换面的程度来切换控制器的结构,使系统按照切换面所确定的规律运动,对非线性控制系统具有较好的鲁棒性。但控制效果依赖于趋近律的设计,同时在切换面附近容易引起高频抖动,使得控制效果变差[3,4]。人工神经网络具有自学习、自适应的功能,具有表达任意非线性函数的能力,非常适合复杂非线性系统控制,具有较好的自适应性[5,6]。但基于多层结构的神经网络结构复杂,通常需要对被控对象的特性进行辨识,计算过程复杂,在线调节周期过长,难以适应快速实时控制要求[7,8]。单神经元自适应 PD控制器不但结构简单,学习算法意义明确,计算量小,易于控制器程序实现,且能适应控制对象的变化,具有较强的鲁棒性和自适应性,是一种具有实用价值的神经网络控制算法[8,9]。本文针对离合器位置跟踪控制问题,首先设计一种新的驱动机构用以改善系统性能,然后提出了一种单神经元自适应 PD控制算法,设计了神经元控制器,并进行了离合器接合过程的静态和动态实验研究。

2 离合器驱动机构设计与分析

设计的离合器驱动机构简化示意图如图 1所示,由永磁直流电机、自锁式蜗轮蜗杆机构、弹簧补偿机构、位置传感器、机械限位机构和拉索等组成。

永磁直流电机额定电压为 12V,额定转速 2 700 r/min,额定功率为 100W。蜗轮蜗杆机构减速比为 1∶60,具有自锁功能。通过电机的正反转带动拉索可实现离合器的接合与分离。在分离过程中电机负载为离合器负载和蜗轮蜗杆摩擦负载之和,由于自锁式蜗轮蜗杆传动效率较低,这就需要电机具有较大的功率。在接合过程中电机负载为蜗轮蜗杆摩擦负载与离合器负载之差。离合器负荷特性具有非线性特性,变化范围大,给离合器的精确跟踪控制带来了不利影响。为减小电机功率,改善离合器接合性能,对驱动机构加装力矩补偿机构,补偿机构采用蜗卷弹簧,它安装在蜗轮轴上,在离合器分离时,起正向助力作用,以减轻电机负载;在离合器接合时,起反向助力作用,可以改善接合性能。图 2是驱动机构实物图。图 3是加装补偿装置以后离合器负荷特性。从图中可以看出,加装补偿装置后,电机负荷显著降低,这对于减小电机功 率,改善系统动态响应性能有明显好处。

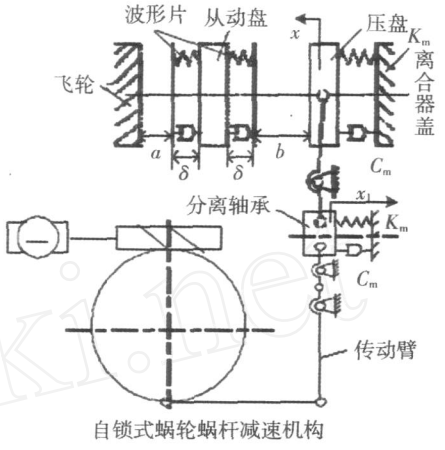

图 1 电机驱动式自动离合器结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of automatic clutch driven by DC motor

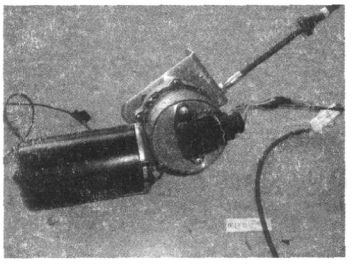

图 2 离合器驱动机构

Fig. 2 Driving mechanism for clutch

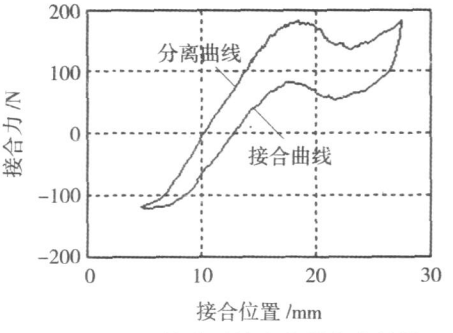

图 3 补偿后的离合器负荷特性

Fig. 3 Load characteristic of for clutch clutch after compensating

根据电机理论,可得系统的运动方程为

$$\left.\begin{aligned} u_a &= L_a\frac{di}{dt} + R_a i_a + C_e\frac{d\theta}{dt}, \\ T_e &= T_L + J\frac{d^2\theta}{dt^2} + f_m\frac{d\theta}{dt}, \\ T_e &= c_m i_a。 \end{aligned}\right\} \tag{1}$$

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

其中：u_a 为电枢电压；L_a 为电枢电感；R_a 为电枢电阻；C_e 为电动势系数；T_e 为电磁转矩；T_L 为蜗杆的输出转矩；J 为电机转动惯量；f_m 为粘性阻力系数；c_m 为转矩常数；i_a 为电枢电流。

忽略蜗轮的转动惯量，当离合器分离时，有

$$T_L \frac{\tan(\gamma)}{\tan(\gamma+\phi)} = T_c, \tag{2}$$

当离合器结合时，有

$$T_L \frac{\tan(\gamma)}{\tan(r-\phi)} = T_c。 \tag{3}$$

式中：γ 为蜗杆导程角；ϕ 为蜗轮蜗杆当量摩擦角；对于自锁式蜗轮蜗杆，$\phi > \gamma$；T_c 为离合器负荷所产生的折算到蜗轮上的力矩。

3　神经元自适应 PID控制器设计

3.1　控制器结构

一般伺服系统均采用位置 - 速度 - 电流三闭环控制方式，速度环需要采用成本较高的光电编码器，且三个控制环的参数整定比较复杂[10]，受车辆上振动以及成本等因素影响，驱动机构上没有安装光电编码器，离合器位置跟踪采用位置 - 电流双闭环控制方式。由于离合器目标接合速度随着发动机和车辆状态实时变化，同时离合器和电机非线性特性严重，常规控制方法难以获得到良好的控制精度和鲁棒性，若离合器跟踪过慢，则可能造成发动机轰响及接合时间过长，导致起步过慢及滑摩功显著增加；若离合器跟踪过快，则会产生过大的起步冲击，甚至使发动机熄火。单神经元 PID控制器不但结构简单，而且具有自学习和自适应能力，能够适应环境的变化，具有较强的鲁棒性。利用单神经元构建离合器位置调节器，利用神经元的自学习功能对权值自动进行调整，从而获得自适应 PID的控制特性。一般神经元控制器比例系数为固定值，其取值对于控制器的性能有较大影响，且一般根据经验或实验得到。为克服一般神经元控制器比例系数固定不易调整的缺点，利用 PSD算法实现对比例系数的自动调整，以进一步增强神经元控制器的灵活性。电流调节器采用常规 PID调节，输出为电机 PWM值。整体控制系统结构如图 4所示。

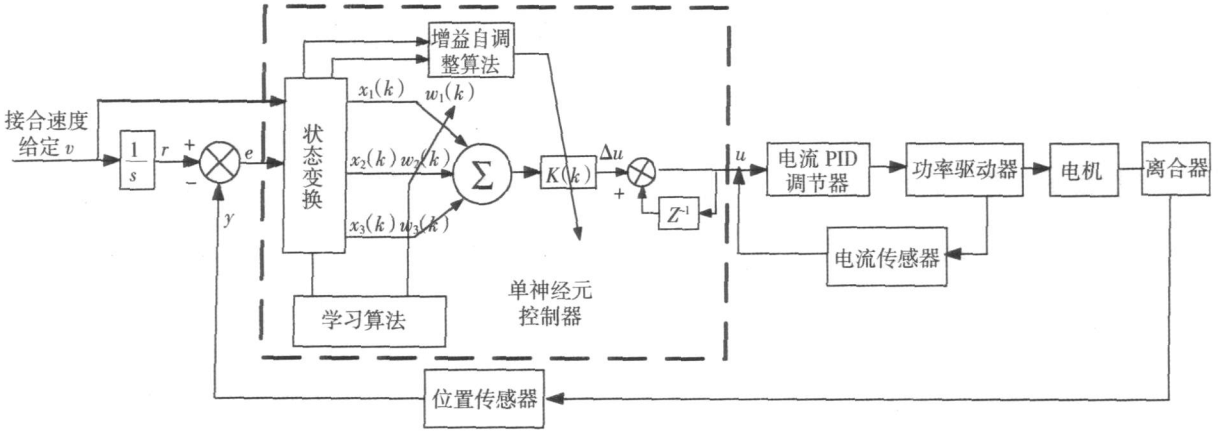

图 4　离合器位置单神经元自适应控制系统结构

Fig. 4　Structure of single neuron adaptive control system for clutch position

3.2　神经元 PID控制算法

一般神经元 PID控制器输入采用误差、误差微分和误差二阶微分[12-14]，由于给定接合速度 v 是实时变化和事先未知的，为加快系统的响应速度，将 v 作为一个前馈控制量引入到神经元中，作为神经元的一个输入，另外两个输入采用位置误差和误差微分，即 $x_i(k)$ 选择为

$$\left.\begin{aligned} x_1(k) &= v(k), \\ x_2(k) &= r(k) - y(k) = e(k), \\ x_3(k) &= e(k) - e(k-1)。 \end{aligned}\right\} \tag{4}$$

神经元输出 $u(k)$ 为

$$u(k) = \Delta u(k) + u(k-1) = K(k)\sum_{i=1}^{3} w_i'(k)\, x_i(k) + u(k-1), \tag{5}$$

其中

$$w_i'(k) = w_i(k) / \sum_{i=1}^{3} |w_i(k)|, \quad i = 1, 2, 3。$$

式中：$u(k-1)$ 为上一时刻神经元输出量；$\Delta u(k)$ 为输出量增量；$K(k)$ 为神经元比例系数；$w_i(k)$ 为输入量 $x_i(k)$ 的权系数。

在神经元的学习算法中，借用最优控制理论中二次型性能指标的思想，在加权系数的调整中引入二次型性能指标，实现对误差的约束控制。取性能指标为

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$E(k) = \frac{1}{2}[r(k) - y(k)]^2 = \frac{1}{2}e(k)^2。\quad (6)$$

按照梯度下降法修正权系数,即

$$\Delta w_i(k) = -\eta_i \frac{\partial E(k)}{\partial w_i(k)}, \quad (7)$$

式中 η_i 为学习速率, $0 < \eta_i < 1$, $i = 1, 2, 3$。

由式(5)、(6)可得

$$\frac{\partial E(k)}{\partial w_i(k)} = \frac{\partial E(k)}{\partial y(k)} \frac{\partial y(k)}{\partial u(k)} \frac{\partial u(k)}{\partial w_i(k)},$$

式中, $\frac{\partial E(k)}{\partial y(k)} = -e(k)$, $\frac{\partial u(k)}{\partial w_i(k)} = K(k)x_i(k)$。由于 $\frac{\partial y(k)}{\partial u(k)}$ 未知,采用差分来近似处理,得

$$\frac{\partial y(k)}{\partial u(k)} \approx \frac{\Delta y(k)}{\Delta u(k)} = \frac{y(k) - y(k-1)}{u(k) - u(k-1)}。$$

若令 $\lambda(k) = \frac{y(k) - y(k-1)}{u(k) - u(k-1)}$,则可以得到

$$\left.\begin{aligned} w_1(k+1) &= w_1(k) + \eta_1 K(k)e(k)x_1(k)\lambda(k), \\ w_2(k+1) &= w_2(k) + \eta_2 K(k)e(k)x_2(k)\lambda(k), \\ w_3(k+1) &= w_3(k) + \eta_3 K(k)e(k)x_3(k)\lambda(k)。\end{aligned}\right\} \quad (8)$$

利用式(8)即可实现权值的重复学习。w_1、w_2、w_3 的初值分别取为 0.3、0.5、0.7, η_1、η_2、η_3 分别取为 0.3、0.8、0.5, K值由 PSD自调整算法确定。

神经元自适应控制器可理解成由前馈比例控制、反馈比例微分控制三部分组成可自行调节参数的一种多层次多模式的控制结构。前馈和反馈互为一体,互为关联,互为补偿。前馈控制将设定信号 $v(t)$ 通过 $w_1'(t)$ 直接作用于受控对象,可加快系统的响应速度,反馈比例控制能迅速减小超调值。神经元通过自身的学习策略不停地自行调整 $w_i'(t)$ $(i = 1, 2, 3)$,从而改变控制器的特性,进而获得良好的动态控制性能。

3.3 神经元增益 K的自动调整算法

K值的选取对于神经元 PID控制器的性能影响较大, K越大,则控制器快速性越好,但可能导致较大超调,甚至使系统不稳定;若 K值选择过小,则会使系统的快速性变差[7,8]。一般神经元控制器 K值为固定值,主要通过经验和实验得到。由 Marsik和 Strejc提出的 PSD(比例、求和、微分)控制算法不须辨识系统特征,仅通过分析误差的变化就可对比例系数进行自动调节,形成自适应闭环控制系统[11]。为减小 K值的选取对于控制性能的影响,进一步改善神经元控制器自适应能力,本文采用 PSD算法进行神经元增益的自动调整。

K值自动调整算法如下:

令 $\Delta e(k) = e(k) - e(k-1)$,

$\Delta^2 e(k) = e(k) - \Delta e(k-1)$。

当 $\mathrm{sign}[e(k)] = \mathrm{sign}[e(k-1)]$时,

$$K(k) = K(k-1) + CK(k-1)/T_v(k-1);$$

当 $\mathrm{sign}[e(k)] \neq \mathrm{sign}[e(k-1)]$时,

$$K(k) = 0.75K(k-1)。$$

其中,

$$T_v(k) = \frac{|\Delta e(k)|}{|\Delta^2 e(k)|},$$

$$\Delta T_v(k) = L^* \mathrm{sign}(|\Delta e(k)| - T_v(k-1) \cdot |\Delta^2 e(k)|)。$$

式中 $K(k)$、$K(k-1)$ 表示 k、$k-1$时刻的 K值, $T_v(k)$、$T_v(k-1)$ 为调整参量, $\Delta T_v(k)$ 为 $T_v(k)$ 的增量。C、L^* 为调整系数,其范围一般为 $0.025 \leq C \leq 0.05$, $0.05 \leq L^* \leq 0.1$。因此 K的初值取为 3, $C = 0.03$, $L^* = 0.07$。

采取比例系数自调整策略后, K值的选取就不用那么严格,可以在较大范围内选取,进一步提高了系统的适应性。

4 实验系统与结果分析

实验平台由自动离合器控制器、实验用车(发动机 - 变速箱台架)、离合器驱动机构和移动计算机数据采集系统等组成。控制系统核心采用 infineon XC164CS高性能单片机,其具有丰富的外围功能部件和快速的运算能力。位置传感器采用的是线性角度位置传感器,离合器接合位置与传感器输出信号成比例关系。A/D分辨率为 10位,离合器接合位置范围为 0 ~ 30mm,对应位置传感器读数范围为 158 ~ 800,折合到摇臂端的控制精度是 0.046mm,可以满足离合器接合控制精度要求。离合器位置跟踪控制器位置环采用神经元自适应 PID控制算法,电流环采用常规 PID控制算法。电机功率驱动器采用 H桥可逆驱动,控制方式为 PWM控制。实验用车为哈飞民意微型车。实验过程中的控制参数和结果参数可通过 RS-232通信实时传送到上位机,上位机通过自行编制的软件进行数据采集,通过对采集的实验数据进行分析,可找出控制软件的不足之处并对其进行完善,进而改进控制系统的性能。

4.1 静态实验分析

离合器静态接合实验在发动机 - 变速箱台架上进行,离合器接合速度指令人为给定。根据实际经验,离合器滑摩过程中接合速度在 2.8 ~ 13.8mm/s之间,负速度表示回退,在特殊情况下离合器由于接合过多需要慢速回退。离合器目标接合速度变化程

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

度越大,对控制器鲁棒性能要求就越高,为验证控制器的性能,实验中离合器目标接合速度以较大变化程度变化,接合速度给定分为 4个阶段,分别为 9.62mm/s, 3.26mm/s, - 3.26mm/s, 9.62mm/s,时间过程分别为 0.4s, 0.8s, 0.8s和 1.28s。图 5是采用常规 PID控制的跟踪结果,图 6是采用神经元自适应 PID控制的跟踪结果。

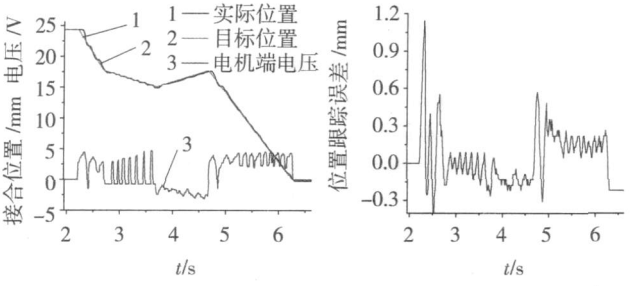

图 5　常规 PID控制实验结果

Fig. 5　Experiment results of common PID control

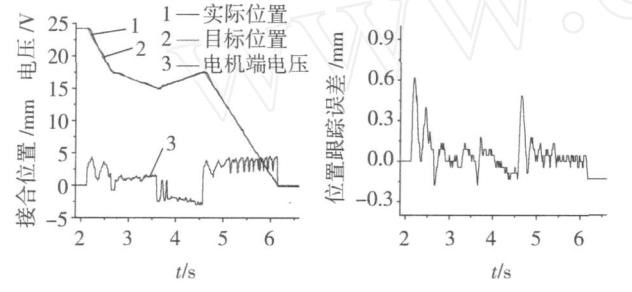

图 6　神经元自适应 PID控制实验结果

Fig. 6　Experiment results of neuron adaptive PID control

图 5和图 6中曲线 2为离合器目标接合位置曲线,1为实际位置跟踪曲线,曲线 3为 PWM控制下电机电枢平均电压,正电压表示电机正向驱动,负电压表示反向驱动。图 5和图 6中右图是离合器位置跟踪误差曲线,对比可以看出,神经元自适应 PID控制比常规 PID控制最大误差要小 50%左右,且振荡幅度和次数明显减小,稳态误差减小,具有良好的动态控制性能。离合器位置在启动阶段和速度反向阶段误差较大,这是由于电机存在机械惯性无法消除,只能通过一定的手段来减小。从图中可以看出,虽然离合器目标接合速度变化比较剧烈,其变化幅度为 6.36mm/s, 6.52mm/s, 12.88mm/s,但动态位置误差可令人接受,表明神经元控制器具有较好的鲁棒性和控制精度。

4.2　动态实验分析

在实际工作过程中,离合器接合速度是实时变化的,控制器需能适应离合器负荷特性和目标速度的非线性变化。在哈飞民意样车上加装自动离合器控制系统并进行了大量实验。图 7是某次车辆起步曲线。图中曲线自上而下分别表示的是发动机转速和离合器输出轴转速(r/min)、油门开度、离合器目标接合位置和实际接合位置及其误差。起步过程中油门历程为 20%。起步过程中,发动机转速变化平稳,车辆起步平稳快捷,离合器滑摩时间约为 0.9s,滑摩功较小。由图 7可知,接合过程中离合器接合速度是实时变化的,但控制器能够控制离合器位置跟随目标曲线变化,且误差较小(在滑摩过程中最大误差为 0.15mm),能够满足实时控制要求。最大误差出现在启动和快速接合阶段,此时离合器处于空行程和完全接合阶段,对车辆起步性能没有什么影响。

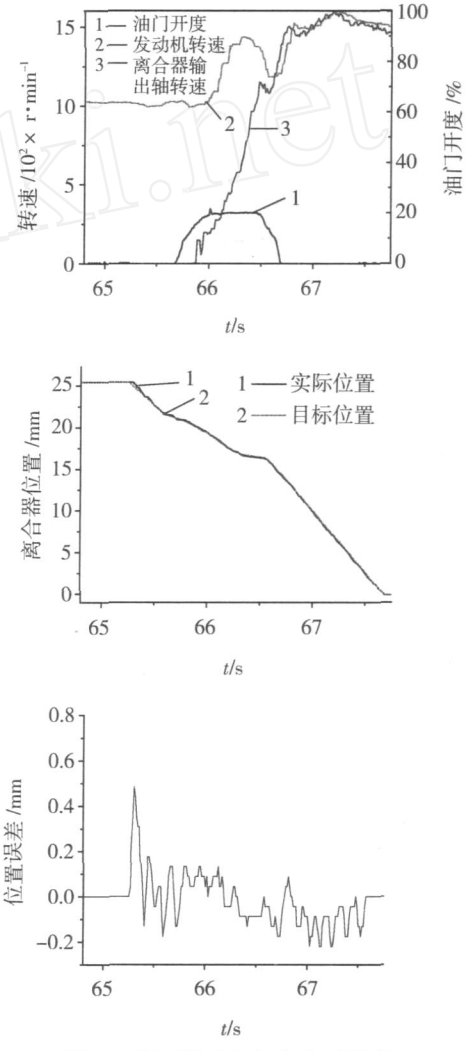

图 7　离合器动态接合实验结果

Fig. 7　Experiment results of clutch dynamic jointing

5　结　语

1) 设计了一种新的离合器驱动机构,采用蜗卷弹簧进行力矩补偿,它能够有效减小电机负荷,同时能够改善系统动、静态性能。此装置结构简单、可靠,成本低,实用性高;

2) 离合器位置跟踪控制是一个复杂非线性控制问题,本文利用神经元控制理论,设计了具有前馈

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

控制作用的增益可调整离合器神经元自适应 PID控制器。实验表明,与常规控制器相比,它能够有效减小位置跟踪动、静态态误差,提高了系统动态性能,能够适应离合器负荷和目标接合速度的非线性变化,具有良好的鲁棒性,可以满足离合器位置跟踪控制要求。

参 考 文 献:

[1] 黄建明,曹长修,苏玉刚. 汽车起步过程的离合器控制[J]. 重庆大学学报(自然科学版),2005,28(3): 91 - 94.
HUANG Jianming, CAO Changxiu, SU Yugang. Clutch control for automotive start-up process[J]. *Journal of Chongqing University (Natural Science Edition)*, 2005,28(3): 91 - 94.

[2] 程东升. 电机驱动自动离合器接合过程的动力学特性及控制研究[D]. 上海:上海交通大学,2003.

[3] RIGATOS G G, TZATESTAS C S, TZATESTAS S G. Mobile robot motion control in partially unknown environment using a sliding mode fuzzy-logic controller[J]. *Robotics and Autonomous systems*, 2000,33(4):1 - 11.

[4] RAHMAN M A, HOQUE M A. On-line adaptive artificial network based vector control of permanent magnet synchronous motors[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1998,30(4):311 - 318.

[5] 李先祥,徐小增,肖红军. 基于小波神经网络控制的无刷直流电机调速系统[J]. 中国电机工程学报,2005,25(9):126 - 129.
LI Xianxiang, XU Xiaozeng, XIAO Hongjun. The speed-adjustment system of brush DC motor based on wavelet ANN[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2005,25(9):126 - 129.

[6] YANG Y, VILATHGAMUWA D M, RAHMAN M A. Imlementation of an artificial-neural-network based real-time adaptive controller for an interior permanent magnet motor driver[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2003,39(1):96 - 10.

[7] 夏长亮,王明超. 基于 RBF神经网络的开关磁阻电机单神经元 PID控制[J]. 中国电机工程学报,2005,25(15):161 - 165.
XIA Changliang, WANG Mingchao. Single neuron PID control for switched reluctance motor base on RBF functional network[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2005,25(15):161 - 165.

[8] 傅平,郭吉丰,丁敬,等. 基于神经元自适应 PID的超声波电机速度位置控制[J]. 电工技术学报,2007,22(2):28 - 33.
FU Ping, GUO Jifeng, DING Jing, *et al*. A neuron adaptive PID speed and position control for ultrasonic motors[J]. *Transaction of China Electrotechnical Society*, 2007,222(2):28 - 33.

[9] 孙宇新,刘贤兴. 神经元控制器在数字调速系统中的实现和应用[J]. 电工技术学报,2005,20(3):85 - 89.
SUN Yuxin, LIU Xianxing. Realization and application of single neuron controller in digital AC motor control system[J]. *Transaction of China Electrotechnical Society*, 2005,20(3): 85 - 89.

[10] 王宏,于泳,徐殿国. 永磁同步电动机位置伺服系统[J]. 中国电机工程学报,2004,24(7):151 - 155.
WANG Hong, YU Yong, XU Dianguo. The postion servo system of PMSM[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2004,24(7):151 - 155.

[11] 焦斌,林家骏. 直流伺服系统中单神经元 PSD应用的改进[J]. 华东理工大学学学报,2003,29(5):518 - 521.
JIAO Bin, LIN Jiajun. Improvement of the application of single-neuron PSD in the direct current servo-control system[J]. *Journal of East China University of Science and Technology*, 2003,29(5):518 - 521.

(编辑:于智龙)

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net