

基于模拟电路的无刷直流电动机神经元控制器*

Neuron Controller for Brushless DC Motor Based on Analog Circuit

罗文广

Luo Wenguang

(广西工学院电子信息与控制工程系 柳州市东环路 545006)

(Dept. of Elec. Info. and Cont. Engi., Guangxi Institute of Tech., Donghuanlu, Liuzhou, Guangxi, 545006, China)

摘要 从神经元特性出发,研究一种适用于无刷直流电动机控制的模拟电路神经元控制器,获得连续的神经元控制器表达式和权值变化表达式,并进行原理框图设计和给出具体的权值学习电路。仿真实验表明,该控制器具有良好的控制品质,证明了该系统的有效性。

关键词 模拟电路 神经元控制器 无刷直流电动机

中图分类号 TP273.2

Abstract A kind of analog circuit neuron adaptive controller applied to brushless DC motor control is discussed. According to neuron characteristic, an analog neuron controller mathematic expression and its weight modulating expression are obtained. The circuit block diagram is designed, and the weight learning circuit is given out. Simulating results have showed that the controller has good control performance, and the system's availability has been proved.

Key words analog circuit, neuron controller, brushless DC motor

直流电动机控制的领域一直以来都是采用PID控制,它在实际应用中获得较好的控制效果。由于电机本身存在非线性问题,并且在运行中其参数发生变化,而PID控制的鲁棒性并不很强,因此在某些高精度伺服系统中其控制难以获得良好的品质。近十年,神经网络控制已在直流电机控制中获得应用^[1-3],尤其神经元控制器,因其结构、调试简单,收敛、调节速度快,易于实现实时控制,控制精度和鲁棒性强,应用更加广泛。目前,电机的神经网络控制几乎都采用数字控制的方式,即通过软件编程的方式来实现,而采用模拟电路实现的神经元控制器应用于电动机控制的报道不多。模拟电路实现的神经元控制器将具有模拟电路系统具有的优点,比如较低的硬件成本、较强的抗干扰能力和容易调试等,同时它也可以实现神经元权值的连续自动调节,比数字神经元控制器具有更快的调节速度。另外,由于神经元控制器实现的是自适应控制,与模拟PID控制相比,具有更高的控制精度和更强的鲁棒性。本文讨论了一种适用于无刷直流电动机控制的模拟电路神经元控制器。

2002-09-28 收稿,2002-12-20 修回。

* 广西自然科学基金资助项目(桂科自 0066005)。

1 控制系统构成

无刷直流电动机神经元控制系统原理框图如图1所示。图中虚框表示单神经元控制器,BLDCM表示无刷直流电动机系统,包括PWM输出、功率驱动、信号转换和滤波放大、无刷直流电动机等。

神经元的特性取为

$$u(k) = K_u \sum_{i=1}^3 w_i(k) x_i(k), \quad (1)$$

式中 k_u 为神经元的比例系数。权值 $w_i(k)$ 的学习算法采用 δ 算法

$$w_i(k+1) = w_i(k) + \eta_i [y_r(k) - y(k)] x_i(k), \quad (2)$$

式中 $y_r(k)$ 为给定信号; $y(k)$ 为被控对象的实际输出; η_i 为学习率。

状态变量取为

$$\begin{aligned} x_1(k) &= y_r(k), x_2(k) = y_r(k) - y(k) = e(k), \\ x_3(k) &= x_2(k) - x_2(k-1) = \Delta x_2(k) = \Delta e(k), \end{aligned} \quad (3)$$

(1) 式展开后将(3)式代入得

$$\begin{aligned} u(k) &= K_u [w_1(k) y_r(k) + w_2(k) e(k) + w_3(k) \Delta e(k)] \\ &= K_u [u_1(k) + u_2(k) + u_3(k)]. \end{aligned} \quad (4)$$

(4)式表明神经元控制器产生的控制信号由3部分组成:前馈比例控制 $u_1(k)$ 、反馈比例控制 $u_2(k)$ 和反馈微分控制 $u_3(k)$ 。它是一种多层次多模式的控制结构,将前馈和反馈结合在一起。前馈控制将给定信号 $y_r(k)$ 通过权值 $w_1(k)$ 直接作用于受控对象,加快系统的响应速度,同时,由于调节速度加快,对扰动具有一定的抑制作用;反馈比例控制能迅速减少跟踪误差,使系统进入稳态;反馈微分控制可以改善系统的响应速度,减少超调量,提高系统的稳定性。权值 $w_i(k)$ ($i = 1, 2, 3$) 反映了受控对象和过程响应的动态特性,神经元通过学习不断地调整权值,在3种控制的关联作用下迅速消除偏差,使系统快速地进入稳态。

比例系数 K_u 对控制系统的特性有很大的影响,它直接改变控制器的输出量,一般说 K_u 过小会使系统动态响应过程变长,选择过大会导致系统振荡。因此, K_u 必须选择适当,或在控制过程中进行适当地自调整,使对复杂过程控制收到良好的控制效果。本文考虑了 K_u 与系统偏差成线性关系的自调整方法

$$K_u = K_{u0} + \beta \cdot e, \quad (5)$$

式中 K_{u0} 为初值; β 为一正的系数。这两个系数可在实际系统调试时获得。

由(5)式知,系统偏差较大时相应较大,使系统获得较大的调节作用,加快动态响应过程。

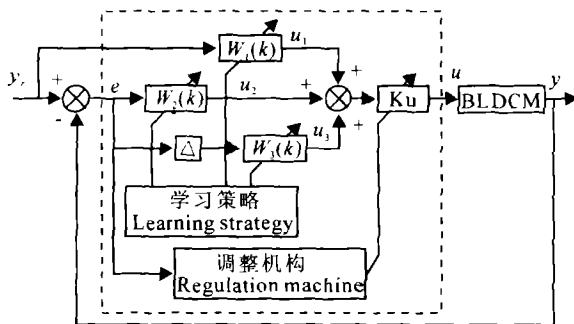


图1 无刷直流电动机神经元控制系统

Fig.1 Neuron controlling system for brushless DC motor

2 神经元控制器电路

由(2)式得^[4]

$$w_i(k+1) - w_i(k) = \eta_i [y_r(k) - y(k)] x_i(k),$$

上式两边同除以采样周期 T , 并将 η_i/T 记为一项 η_i , 当 $T \rightarrow 0$ 时得

$$\frac{dw_i(t)}{dt} = \eta_i [y_r(t) - y(t)] x_i(t),$$

上式两边积分

$$\int_{w_{i0}}^{w_i(t)} dw_i(t) = \int_0^t \eta_i [y_r(t) - y(t)] x_i(t) dt$$

$$= \int_0^t \eta_i e(t) x_i(t) dt,$$

由上式可得

$$w_i(t) = w_{i0} + \int_0^t \eta_i e(t) x_i(t) dt, \quad (6)$$

(6)式说明权值 $w_i(t)$ 可通过学习率、偏差和状态变量的乘积积分获得,实现连续可调。

(4)式可表示为连续的形式

$$u(t) = K_u [w_1(t) y_r(t) + w_2(t) e(t) + w_3(t) \Delta e(t)]. \quad (7)$$

根据(3)、(6)、(7)式可以获得如图2所示的神经元控制器电路实现原理框图。图中所有的比较器、乘法器、微分器、加法器等均可以用运算放大器、多功能转换器、电阻、电容等元件构成。图中的大部分器件都是比较常规的,这里仅给出权值学习器的具体电路。

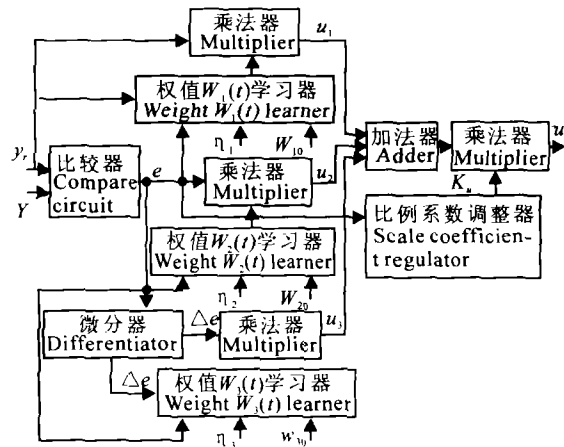


图2 神经元控制器电路原理框图

Fig.2 Block diagram of neuron controller circuit

图3为根据(6)式设计的权值 $w_1(t)$ 的学习电路,由乘法电路、限幅积分器和反相加法器构成。乘法电路主要由多功能转换器4302构成,实现偏差 e 、学习率 η_1 和给定 y_r 三者相乘。4302是一种性能优越的多功能运算变换器,通过适当的电路连接可以实现乘法、除法、开方、乘方等多种运算功能。乘法运算的精度为 $\pm 0.25\%$ 。

限幅积分器的输入输出有如下关系:

$$U_o = \frac{R_4}{R_3 R_7 C_1} \int U_i dt, \quad (8)$$

它具有较大范围的积分时间,根据电容、电阻不同的取值,其范围为 $10 \text{ ns} \sim 1000 \text{ s}$ 。 D_1, D_2, D_3, D_4 和 R_6 为箝位电路,对输出起限幅作用。开关 S_1 闭合可以使输出为零。

反相加法器实现初始权值与调节过程中变化的权值相加。

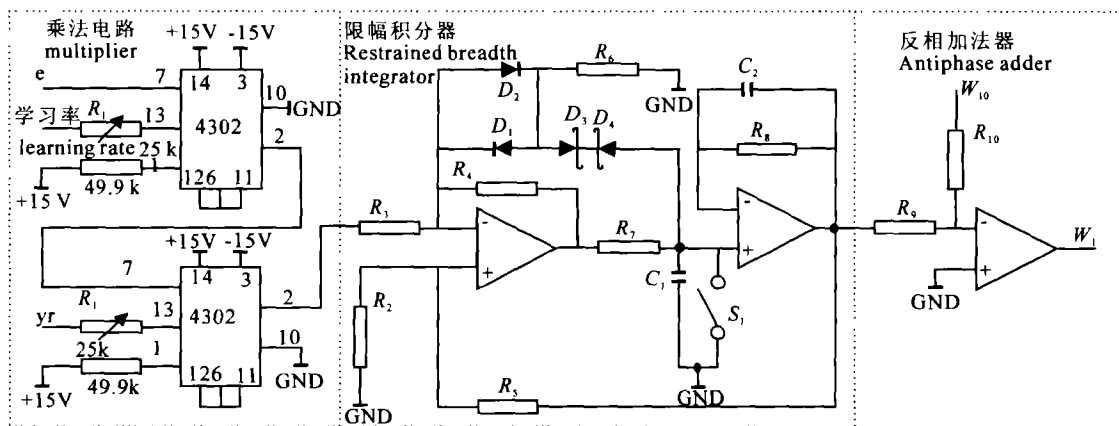


图3 权值学习器电路

Fig. 3 Circuit of weight learner

图2中的比例系数调整器是根据(5)式设计的,由乘法电路和加法器构成。若比例系数不需要调整,可不要此电路。

3 仿真实验

3.1 BLDCM 模型^[3]

稀土永磁无刷直流电动机的实际参数如下: $u = 50$ VDC, $I_a = 0.267$ A, $T_N = 0.00784$ Nm, $n = 3000 \sim 25000$ r/min, $K_e = 0.0188$ Vs/rad, $R_a = 5\Omega$, $L_a = 1.78$ mH, $J = 3.1 \times 10^{-7}$ Nms, $T_e = 0.356$ ms, $T_m = 2.809$ ms。

功率驱动放大倍数为10,速度反馈系数为0.00191 Vs/rad。

电动机系统的传递函数为

$$G_o(s) = \frac{53.2 \times 10^6}{s^2 + 2809s + 10^6} \quad (9)$$

3.2 仿真结果

对模拟PID控制器和模拟电路神经元控制器进行了仿真。PID控制器的参数是采用工程设计法再经凑试获得,3个参数为: $K_p = 15.2$, $T_i = 6.33$, $T_d = 0.001$ 。

神经元控制器的参数取为:三个学习率分别为8、5、7,三个权值初值取为0.15、0.2、0.1,比例系数 K_u 的调整公式为 $K_u = 0.12 + 0.1 \times e$ 。

进行了电机起动、测量通道有相当于幅值400 r/min变化频率500 Hz干扰信号、给定转速变化等3种情况的仿真,仿真结果分别如图4至图6所示。图中虚线为PID控制的仿真结果,实线为模拟电路神经元控制器的仿真结果。

由仿真结果得以下结论:

(I) 模拟电路神经元控制器具有更快的调节速度,由图4可知,模拟电路神经元控制器的调节时间为3 ms, PID控制器的调节时间为6 ms;

(II) 由图5可知,模拟电路神经元控制器具有良好的抗扰性能,而PID控制器不能消除干扰,使电机系统运行时产生纹波;

(III) 由图6知,当电机系统的给定转速变化时,模拟电路神经元控制器比PID控制器具有更好的跟踪能力;

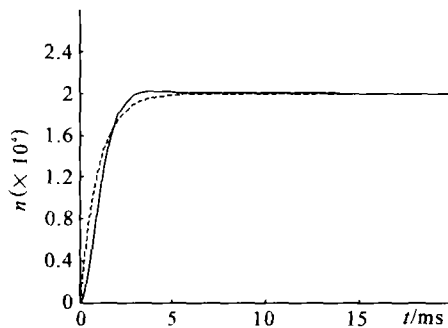


图4 电机起动仿真结果

Fig. 4 Simulation result of motor startup

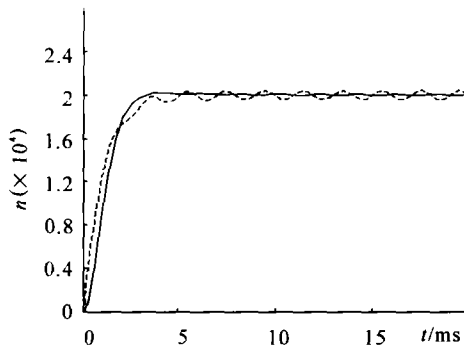


图5 有干扰信号作用的仿真结果

Fig. 5 Simulation result in the effect of disturbance

(IV) 神经元控制器需要设计的参数有8个:3个学习率、3个权值初值、比例系数 K_u 调整公式中的2个参数,比PID控制的设计参数多,但仿真中发现神经元控制器的参数在一定的范围内变化,对系统的

(下转第31页 Continue on page 31)

9 Kahng D, Atalla M M. Presented at the IRE-AIEE Solid-State Device Research Conference, Carnegie Institute of Technology, Pittsburgh, 1960.

10 Wanlass F M. IEEE International Solid-State Circuits Conference. Digest of Technical Papers, 1963; 32.

11 Wong H S P. IBM J Res & Dev, 2002, 46: 133.

12 Moore G. IEDM Tech Digest, 1975, 11~13.

13 de Gennes P G, Prost J. The Physics of Liquid Crystals, Oxf Sci. 2nd Ed. 1993.

14 Reinitzer F. Mh Chem, 1888, 9: 421.

15 Bjornstahl Y. Annln Phys, 1918, 56: 161.

16 Williams R. Nature, 1963, 199: 273.

17 Heilmeier G H, Zaroni L A, Barton L A. Proc Inst elect electron Engrs, 1968, 56: 1162.

18 Kelker H, Scheuerle B. Angew Chem Int Edn(Engl Edn), 1969, 8: 884.

19 Minnesota Mining, Mfg Co. DAS. 1970, 207718.

20 Schadt M, Helfrich W. Swiss Patent, 1970, 532261.

21 Schadt M, Helfrich W. Appl Phys Lett, 1971, 18: 127.

22 Gray G W, Harrison K J, Nash J A. Electronics Lett, 1974, 9: 98.

23 Meyer R B, Liebert L, Strzelecki L et al. J Phys Lett (Paris), 1975, 36: 69.

24 Clark N A, Lagerwall S T. Appl Phys Lett, 1980, 36: 899.

25 Alt P M. Conf Record of the Intl Disp Res Conf, 1997, 19

~28.

26 Sato F, Yagi Y, Hanihara H. SID Intl Symp Digest Tech Papers, 1997, 997.

27 Melcher R L et al. IBM J R&D, 1998, 42: 321.

28 Underwood I, Vass D G, Sillitto R M. IEE Proc, 1986, 133, Pt J: 77.

29 Underwood I. PhD thesis. Univ of Edinburgh, 1987.

30 McKnight D J. PhD thesis. Univ of Edinburgh, 1989.

31 Vass D G, Sillitto R M, Underwood I et al. Proc of IEE Opt Tech Info Proc, 1987. Potter D J PhD thesis Univ of Edinburgh, 1992.

32 Underwood I, Vass D G, Sillitto R M. Proc Soc Photo-Opt Instrum Eng, 1991, 1562: 107.

33 Cotter L K, Drabik T J, Dillon R J et al. Opt Lett, 1989, 15: 291.

34 O'Hara A, Hannah J R, Underwood I et al. Appl Opt, 1993, 32: 5549.

35 Seunarine K, Calton D W, Underwood I. OSA Technical Digest Post-deadline Addendum, Aspen, CO, USA, 1999, PD3~1.

36 Seunarine K, Calton D W. UK Patent Appl No: 9908064. 1999, 8.

37 Miremont C, Bodammer G, Calton D et al. Displays, 2002, 23: 115.

(责任编辑:黎贞崇)

(上接第 23 页 Continue from page 23)

性能影响不大,而 PID 控制器的参数的变化对系统性能影响较大,这也就说明了神经元控制具有较强的鲁棒性,从这个角度上看也可认为神经元控制器的参数更容易设计些。

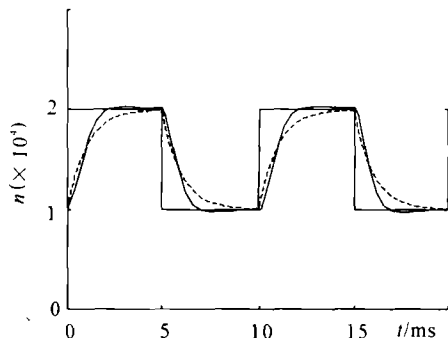


图 6 给定转速信号变化的仿真结果

Fig. 6 Simulation result in the condition of input signal change

4 讨论

以上研究表明,模拟电路神经元控制系统具有较好的控制品质,经仿真实验证明了系统的有效性,但从文中可知模拟电路神经元控制器的电路要比模拟 PID 控制器的电路复杂,在实验室进行实验时,实际

效果没有仿真的理想,主要原因是整个电路使用较多元器件后,电路的时间延迟对系统性能有一定的影响,同时,运算放大器产生漂移的可能性增大。解决这些问题的主要方法是选择高速的、漂移小的元器件。另外,还应进一步研究神经元控制器电路,使其得到简化。

参考文献

1 EI-Sharkawi M A, EI-Samahy A A, EI-Sayed M L. High Performance Drive of DC Brushless Motors Using Neural Network. IEEE Transactions Energy Conversion, 1994, 9 (2): 317~322.

2 Weerasooriya S, EI-Sharkawi M A. Identification and Control of a DC Motor Using Back-Propagation Neural Networks. IEEE Transactions Energy Conversion, 1991, 6(2): 663~669.

3 刘卫国,马瑞卿,戴冠中等.无刷直流电动机控制系统的单神经元控制器.西北工业大学学报,1999,17(1):124~129.

4 罗文广.模拟电路实现的神经元控制器的仿真研究.计算机仿真,2001,18(6):39~41.

(责任编辑:黎贞崇)