

基于 RBF-PID 控制的直流调速系统仿真

裴玉兵¹,朱学来²

(1. 盐城市宏盛新能源科技有限公司;2. 盐城工学院 电气工程学院,江苏 盐城 224005)

摘要:针对工程设计中 PI 控制直流调速系统启动时转速必然超调、自适应性差等问题,在分析双闭环直流调速系统数学模型的基础上,确定了系统的控制策略,并设计了一个 RBF-PID 控制器。利用 RBF 网络的自学习能力实时调节 PID 控制器参数,最终实现系统转速的调节。仿真测试表明:与工程设计的 PI 控制相比,采用 RBF-PID 控制的直流调速系统超调量小、动静态性能好、抗扰性能优、鲁棒性强。

关键词:直流调速系统;数学模型;RBF 网络;自适应控制

中图分类号:TP183 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-5322(2017)04-0021-05

采用常规 PI 控制进行串联校正的双闭环不可逆直流调速系统是一种广泛应用的直流调速系统,具有良好的稳态和动态性能,且结构简单、工作可靠、设计方法简捷,不足之处是:电机启动过程中伴随着转速超调;系统难以抑制参数变化的影响。一旦被控对象模型改变,原有的 PI 调节器参数就不适用于该系统,控制器性能变差,从而控制系统达不到所要求的控制效果。因此,许多学者一直在从事应用新的控制理论和方法进行直流调速系统的调速性能提高研究^[1-6]。文献[4-5]提出用 BP 网络 PID 和模糊 PID 控制方法提高直流调速系统抵抗扰动的能力,但动态性能不如人意;文献[6]提出的 FUZZY-PID 控制过度依赖于 PID 初始参数值的设定。

神经网络控制广泛应用于非线性、时变性以及不确定性的系统,并取得了良好的控制效果,表现出很好的自适应性、实时性和鲁棒性。径向基函数(RBF)网络作为一种神经网络,经常用于控制领域,形成径向基函数神经网络控制。该网络由隐含层和线性输出层构成,采用局部接受域进行函数映射,属于前向网络结构。本文将常规 PID 控制和 RBF 网络相结合,利用 RBF 网络对常规 PID 控制器的控制参数进行实时动态调整。试

验结果表明:RBF-PID 控制的直流调速系统具有良好的动静态性能,且抗干扰能力强、鲁棒性好。

1 常规 PI 控制的双闭环直流调速系统的动态数学模型

PI 控制系统框图如图 1 所示^[7]。

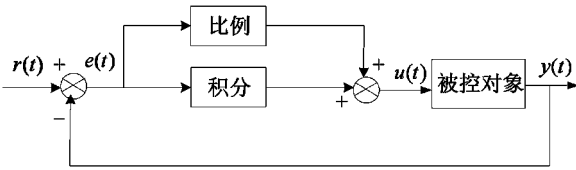


图 1 常规 PI 控制框图

Fig. 1 Common PI control block diagram

根据给定信号 $r(t)$ 与反馈信号 $y(t)$, 得偏差信号 $e(t)$ 。

$$e(t) = r(t) - y(t) \tag{1}$$

PI 控制的输出 $u(t)$ 为:

$$u(t) = k_p(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(r) dt) \tag{2}$$

等式两边作拉氏变换并化简,得 PI 调节器的传递函数 $G(s)$

$$G(s) = k_p(1 + \frac{1}{T_i s}) = k_p \frac{T_i s + 1}{T_i s} \tag{3}$$

收稿日期:2017-09-20

基金项目:江苏省产学研前瞻性联合研究项目(BY2016065-47)

作者简介:裴玉兵(1968—),男,江苏盐城人,工程师,主要研究方向为电力电子技术及电气自动化。

辨识器性能指标函数

$$J = \frac{1}{2}(y(k) - y_m(k))^2 \quad (10)$$

根据梯度下降法,输出的权系数、节点的中心以及节点的基宽参数迭代算法如下:

$$w_j(k) = w_j(k-1) + \eta(y(k) - y_m(k))h_j + \alpha(w_j(k+1) - w_j(k-2)) \quad (11)$$

$$\Delta b_j = (y(k) - y_m(k))w_jh_j \frac{\|X - C_j\|^2}{b_j^3} \quad (12)$$

$$b_j(k) = b_j(k-1) + \eta\Delta b_j + \alpha(b_j(k-1) - b_j(k-2)) \quad (13)$$

$$\Delta c_{ji} = (y(k) - y_m(k))w_jh_j \frac{x_i - c_{ji}}{b_j^2} \quad (14)$$

$$c_{ji}(k) = c_{ji}(k-1) + \eta\Delta c_{ji} + \alpha(c_{ji}(k-1) - c_{ji}(k-2)) \quad (15)$$

式中: η 为学习速率, α 为动量因子。

Jacobian 阵算法为:

$$\frac{\partial y(k)}{\partial u(k)} \approx \frac{\partial y_m(k)}{\partial u(k)} = \sum_{j=1}^6 w_jh_j \frac{c_{ji} - x_i}{b_j^2} \quad (16)$$

式中, $x_i = u(k)$

2.2.2 RBF 网络 PID 整定原理

采用位置式 PID 控制器,控制误差

$$e(k) = r(k) - y(k) \quad (17)$$

PID3 项输入为:

$$xc(1) = e(k) - e(k-1) \quad (18)$$

$$xc(2) = e(k) \quad (19)$$

$$xc(3) = e(k) - 2e(k-1) + e(k-2) \quad (20)$$

控制算法为:

$$u(k) = k_p \cdot xc(1) + k_i \cdot xc(2) + k_d \cdot xc(3) \quad (21)$$

神经网络整定指标为:

$$E(k) = \frac{1}{2}(r(k) - y(k))^2 = \frac{1}{2}e(k)^2 \quad (22)$$

k_p, k_i, k_d 的调整采用梯度下降法:

$$\Delta k_p = -\eta \frac{\partial E}{\partial k_p} = -\eta \frac{\partial E}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial k_p} = \eta e(k) \frac{\partial y}{\partial u} xc(1) \quad (23)$$

$$\Delta k_i = -\eta \frac{\partial E}{\partial k_i} = -\eta \frac{\partial E}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial k_i} = \eta e(k) \frac{\partial y}{\partial u} xc(2) \quad (24)$$

$$\Delta k_d = -\eta \frac{\partial E}{\partial k_d} = -\eta \frac{\partial E}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial k_d} =$$

$$\eta e(k) \frac{\partial y}{\partial u} xc(3) \quad (25)$$

式中, $\frac{\partial y}{\partial u}$ 为 Jacobian 信息,通过 RBF 网络的辨识得到。

RBF 网络整定 PID 控制系统的结构如图 4 所示。

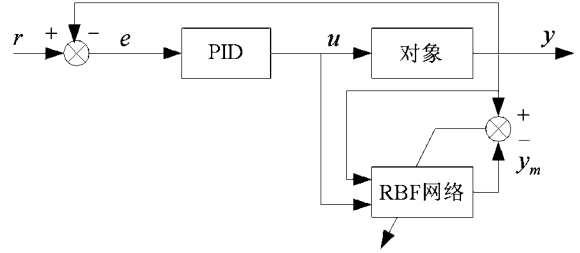


图4 RBF 网络整定 PID 控制框图

Fig.4 Control block diagram of RBF network

2.2.3 RBF-PID 算法步骤

(1) 确定 RBF 网络结构,给出节点中心 C_j 、权值 w_j 、节点宽度 b_j 的初值,选定学习速率和动量因子。

(2) 采样得到 $u(k)$ 、 $y(k)$ 、 $y_m(k)$,计算该时刻误差 $y(k) - y_m(k)$ 。

(3) 采用下降法调整 RBF 辨识网络的节点中心 C_j 、权值 w_j 、节点宽度 b_j ,并根据 Jacobian 算法辨识 $\frac{\partial y(k)}{\partial u(k)}$ 。

(4) 使用梯度下降法计算 Δk_p 、 Δk_i 、 Δk_d ,调整 k_p, k_i, k_d ,计算控制器的输出 $u(k)$ 。

(5) 更新参数,返回步骤 2,进行新一轮学习。

2.2.4 双闭环直流调速系统的 RBF 网络 PID 控制^[10-11]

基于 RBF-PID 控制的直流调速系统框图如图 5 所示。图 5 中,电流 $W_{ACR(s)}$ 采用 PI 调节器,以提高其动态响应能力;电流环被校正为典 I 型系统,采用工程设计方法设计电流 $W_{ACR(s)}$;转速 $W_{ASR(s)}$ 采用 RBF-PID 控制器,其参数由 RBF 网络整定得到,以达到更优的控制性能。

3 仿真实验研究

3.1 仿真建模与参数设置^[8]

系统给定参数:220 V,136 A,1 460 r/min, $C_e = 0.132 \text{ V} \cdot \text{min/r}$, $\lambda = 1.5$; $K_s = 40$; $R = 0.5 \Omega$; $T_l = 0.03 \text{ s}$, $T_m = 0.18 \text{ s}$; $\beta = 0.05 \text{ V/A}$ ($\approx 10 \text{ V/1.5 I_N}$), $\alpha = 0.007 \text{ V} \cdot \text{min/r}$ ($\approx 10 \text{ V/n_N}$), $T_{oi} = 0.002 \text{ s}$, $T_{on} = 0.01 \text{ s}$ 。

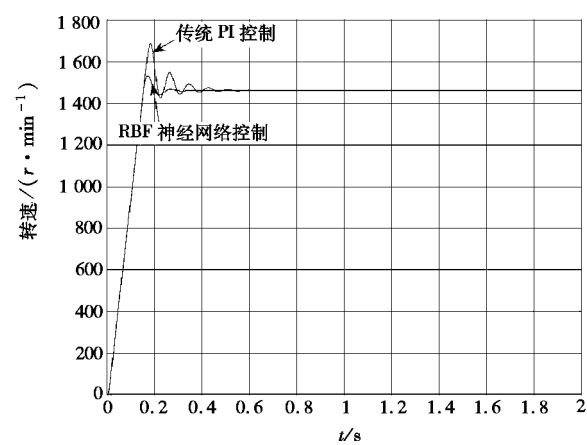


图 8 电枢电阻变化时转速曲线
Fig. 8 Dynamic response curve of speed when the armature resistance change

动略有超调,但 PID 控制的转速启动过程出现较大幅度的振荡。

当电动机转速以 1 460 r/min 恒定运行,在 $t = 1.5\text{ s}$ 时突加 10% 的瞬时负载扰动,电动机转速特性曲线如图 9 所示。

由图 8、图 9 仿真实验曲线可以发现,当电枢电阻变化及负载扰动时,RBF 网络 PID 控制能够根据环境变化自动学习,并实时调节 PID 的比例、积分、微分 3 个参数,自适应性强,系统能够克服外界扰动,电机转速恢复稳定运行较快。

综上所述,相较于传统 PI 控制,RBF 网络 PID 控制有较强的自学习、自适应和逼近能力,较强的鲁棒性,更适合于直流电机的转速控制。

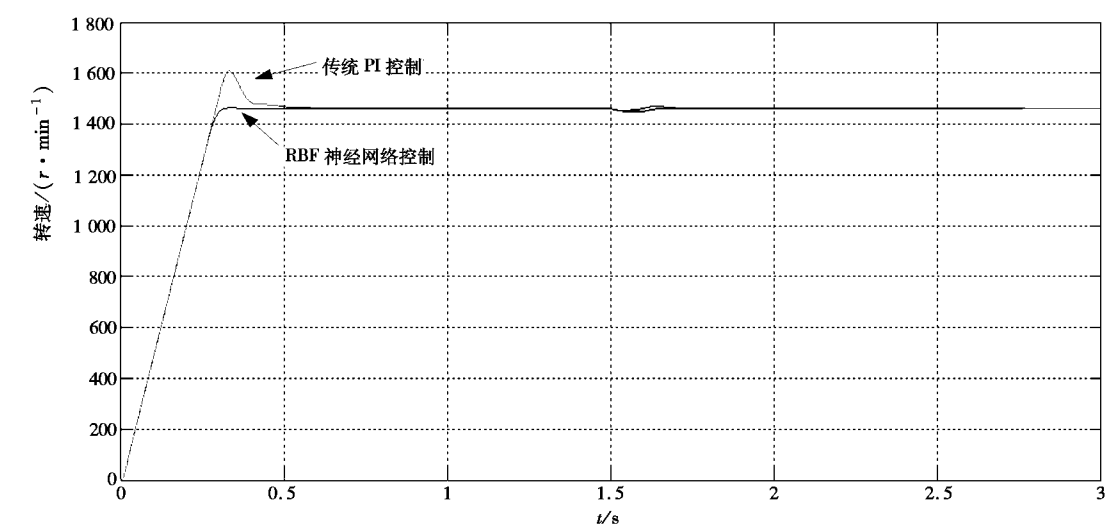


图 9 突加 10% 负载时转速恢复特性曲线
Fig. 9 Recovery characteristic curve of speed when the load suddenly add 10 percent

4 结论

针对常规 PI 控制方法无法适应双闭环直流调速系统的非线性、时变、不确定性,以及电机启动过程中的转速超调,难以抑制参数变化的影响,将 RBF-PID 控制应用于直流调速系统,利用 RBF 网络自学习能力,不断实时在线调节 PID 控制器

的比例、积分和微分控制参数,实现快速启动,有效抑制外界干扰。仿真实验结果表明:RBF-PID 控制具有较强的自学习、自适应和逼近能力,较强的鲁棒性,更适合双闭环调速系统的转速控制,在动态性能、稳态精度、抗扰性能以及鲁棒性能方面均取得了令人满意的控制效果。

(下转第 53 页)