doi:10.16018/j.cnki.cn32 - 1650/n.201704005

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]。





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)。

$$e(t) = r(t) - y(t)$$
 (1)

PI 控制的输出 u(t)为:

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

$$G(s) = k_p (1 + \frac{1}{T_I s}) = k_p \frac{T_I s + 1}{T_I s}$$
(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。

设计方法设计参数如下[8-10]:

$$W_{ASR}(s) = k_{pm} \frac{\tau_n s + 1}{\tau_n s}$$
(4)

$$W_{ACR}(s) = k_{pi} \frac{\tau_i s + 1}{\tau_i s}$$
(5)



图 2 直流调速系统的动态结构图



2 双闭环直流调速系统的控制策略

2.1 双闭环直流调速系统启动与抗扰过程分析

式中:s为拉氏算子,k。为比例系数,T,为积

将 PI 控制应用于双闭环直流调速系统后的 动态结构图如图 2 所示,图中 W_{ASR}(s)和 W_{ACR}(s) 分别表示转速和电流调节器的传递函数。按工程

双闭环直流调速系统的转速、电流调节器均 采用 PI 调节器,其参数采用工程设计方法得到。 启动时,电动机在给定的最大电流下以最大的恒 定加速度启动到给定转速,此时转速 PI 调节器的 输入为零,但在积分作用下其输出保持限幅状态。 电动机以最大电流加速启动,速度必然超调,且给 定转速越小,启动到给定转速的超调量反而越大, 这对转速超调和动态抗扰性能要求较高的生产机 械来说是极为不利的。

此外,对于双闭环直流调速控制系统,当给定 电压、电枢电阻或负载等发生扰动时,控制对象模 型发生了变化,而原有的 PI 控制自适应性能较 差,PI 控制器参数只能控制变化前的状态,从而 转速出现振荡,转速的超调量也有可能变大;当转 速超调量大到一定程度时就会损伤电机,控制系 统也有可能被破坏。

2.2 基于 RBF 神经网络参数自整定 PID 控制^[7]
 2.2.1 神经网络学习算法

RBF 网络为3 层前向网络,包含输入层、隐含 层和输出层,如图 3 所示(选取 3 - 6 - 1 结构)。 RBF 神经网络能任意逼近非线性函数,学习速率 极快,可避免陷入局部极小。

图 3 中, $X = [x_1, x_2, x_3]^T$ 为输入向量, RBF



图 3 RBF 网络结构示意图 Fig. 3 Structure diagram of RBF network

径向基向量 $H = [h_j]^T, h_j$ 为高斯基函数, $j = 1, 2, \dots, 6_{\circ}$

$$h_j = \exp(-\frac{\|Z - C_j\|^2}{2b_j^2}), \quad j = 1, 2, \dots, 6$$
 (6)

网络第j个节点的中心矢量 $C_j = [c_{j1}, c_{j2}, c_{j3}]^T$ 。

设基宽向量

$$\boldsymbol{B} = [b_j]^T \tag{7}$$

 b_j 为节点 j 的基宽度参数,且 $b_j > 0, j = 1, 2, ..., 6_o$

网络的权向量

$$\boldsymbol{W} = \begin{bmatrix} w_j \end{bmatrix}^T, \quad j = 1, 2, \cdots, 6$$
(8)

辨识网络输出

$$y_m(k) = w_1 h_1 + w_2 h_2 + \dots + w_6 h_6$$
 (9)

分时间常数。

辨识器性能指标函数

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

$$w_{j}(k) = w_{j}(k-1) + \eta(y(k) - y_{m}(k))h_{j} + \alpha(w_{j}(k+1) - w_{j}(k-2))$$
(11)
$$\Delta b_{j} = (y(k) - y_{m}(k))w_{j}h_{j} \frac{||X - C_{j}||^{2}}{b_{j}^{3}}$$

$$b_{j}(k) = b_{j}(k-1) + \eta \Delta b_{j} + \alpha(b_{j}(k-1) - b_{j}(k-2))$$
(13)

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

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

式中: η 为学习速率, α 为动量因子。 Jacobian 阵算法为:

$$\frac{\partial y(k)}{\partial u(k)} \approx \frac{\partial y_m(k)}{\partial u(k)} = \sum_{j=1}^6 w_j h_j \frac{c_{ji} - x_1}{b_j^2} \quad (16)$$

式中, $x_1 = u(k)$

2.2.2 RBF 网络 PID 整定原理

采用位置式 PID 控制器,控制误差

$$e(k) = r(k) - y(k)$$
 (17)
PID3 项输入为:

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

$$xc(2) = e(k) \tag{19}$$

xc(3) = e(k) - 2e(k-1) + e(k-2) (20) 控制算法为:

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

神经网络整定指标为:

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

 k_p, k_i, k_d 的调整采用梯度下降法:

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

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

$$\triangle k_{d} = -\eta \frac{\partial E}{\partial k_{d}} = -\eta \frac{\partial E}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial k_{d}} =$$

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

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, Ce = 0.132 V · min/r, λ = 1.5; K_s = 40;R = 0.5 Ω; T_l = 0.03 s, T_m = 0.18 s; β = 0.05 V/A (≈10 V/ 1.5 I_N), α = 0.007 V · min/r(≈10 V/n_N), T_{oi} = 0.002 s, T_{on} = 0.01 s₀ 基于 Simulink 工具箱建立 RBF-PID 控制直 PID 控制器的性能。为获得仿真结构 RBF-PID 控 流调速系统仿真模型,并通过仿真试验测试 RBF-制器采用 S函数封装,如图 6 所示^[11]。



图 5 RBF-PID 控制直流调速系统结构图

Fig. 5 Structure diagram of DC speed control system using RBF-PID





仿真中 RBF 网络采用 3-6-1 的结构,即辨 识网络输入为 u(k-1)、y(k)和 y(k-1),学习速 率 0.155,惯性系数 0.025,初始 PID 参数[15;8; 0.003],初始权系数[6 10 4]。

3.2 仿真结果分析

电机分别在传统 PI 控制和 RBF 网络 PID 控制下,空载启动,考察系统动态响应能力。系统转速动态响应特性曲线如图 7 所示,从图 7 可以发现,RBF-PID 控制的直流调速系统动态响应快、超调小、稳态无静差,具有较好的动静态特性,明显优于传统 PI 控制。

当直流电动机电枢电阻由 $R = 1 \Omega$ 变为 $R = 0.5 \Omega$,电动机转速动态变化过程特性曲线如图 8 所示。由图 8 可知:当电机自身参数发生变化时,系统非线性进一步增强,RBF-PID控制的转速启







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 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)