

改进神经网络优化PID和模糊理论在异步电动机中的应用

为了提高异步电动机的控制器准确度，针对传统PID控制存在的一些不足，提出了一种改进神经网络优化PID和模糊理论的异步电动机控制策略。首先采用神经网络对异步电动机PID控制器的三个参数进行实时、自适应调整，并通过改进粒子群算法优化神经网络参数；然后利用模糊控制器替代异步电动机的滞环控制器；最后通过仿真实验对其性能进行测试。实验结果表明，该控制策略大幅度改善了异步电动机控制器的动态响应性能，具有较好的鲁棒性，且实际应用价值更高。

哈斯花/赤峰工业职业技术学院机械与自动化系



哈斯花/高级讲师

异步电动机结构简单、可靠性高，在许多工业控制系统中得到了成功的应用^[1-2]。随着异步电动机应用范围的扩大，人们对其控制准确度的要求日益提高。直接转矩控制是异步电动机传动系统的新技术，相对于其他控制技术，直接转矩控制对电动机参数不敏感，且鲁棒性好，同时具有优异的静、动态性能，因此如何对异步电动机直接转矩进行高准确度的控制，成为电动机系统研究领域的一个重大课题^[3-4]。

针对异步电动机直接转矩的问题，一些研究机构和大型企业展开了深入的探索。当前最常用的控制策略为PID控制^[5]，基于PID的异步电动机直接转矩控制准确度与比例系数、积分系数和微分系数相关，要获得理想的异步电动机直接转矩控制效果，必须对比例系数、积分系数和微分系数进行优化^[6]。传统的优化方法主要有Z-N法和单纯形法^[7-8]，它们实现简单，然而工业控制系统具有非线性和强耦合性，导致异步电动机直接

转矩难以建立准确的数学模型，因此这些方法均存在不足，如单纯形法通用性差、超调量大及响应时间比较长^[9]。目前，异步电动机直接转矩的PID参数优化主要采用神经网络，其中RBF神经网络具有良好的非线性逼近能力，在PID参数优化中应用最为广泛，但是RBF神经网络自身参数也需要优化^[10]。随后，有学者将模糊理论和神经网络进行融合，并应用于异步电动机直接转矩的控制中，但由于模糊控制器参数固定，控制系统的鲁棒性比较差，因此可靠性降低。

为了获得更加理想的异步电动机直接转矩控制效果，针对传统PID控制器存在的不足，提出一种改进神经网络优化PID和模糊理论相融合的异步电动机直接转矩控制策略，实验结果表明，该控制策略提高了异步电动机直接转矩控制系统的准确度，具有较好的应用价值。

异步电动机直接转矩控制的数学模型

异步电动机的直接转矩控制系统工作过程十分复杂，为了对其性能进行准确描述，本文对问题进行了简化，以便建立更合适的异步电动机直接转矩控制数学模型，其空间矢量等效电路如图1所示。

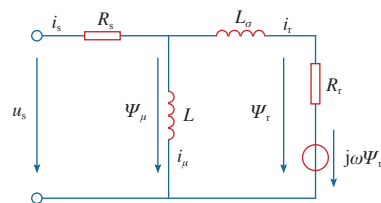


图1 异步电动机的等效电路

关键词/Keywords

异步电动机 ·
模糊控制器 ·
神经网络 ·
粒子群算法 ·

在异步电动机的直接转矩控制系统中, 各种变量关系如下

$$p \begin{pmatrix} \Psi_{\alpha r} \\ \Psi_{\beta r} \end{pmatrix} = \frac{L_r}{L_m} \begin{pmatrix} u_{s\alpha} \\ u_{s\beta} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} R_s + \sigma L_s P & 0 \\ 0 & R_s + \sigma L_s P \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$p \begin{pmatrix} \Psi_{\alpha r} \\ \Psi_{\beta r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{1}{T_r} & 0 \\ \omega_r & -\frac{1}{T_r} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Psi_{\alpha r} \\ \Psi_{\beta r} \end{pmatrix} + \frac{L_m}{T_r} \begin{pmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中, T 为转子常数; σ 为转子漏感系数; p 为微分算子^[11]。

设 θ 为转子旋转磁链矢量与 α 轴的瞬时角速度, 则有

$$p\theta = \frac{\Psi_{r\alpha}(p\Psi_{r\beta}) - \Psi_{r\beta}(p\Psi_{r\alpha})}{\Psi_{r\alpha}^2 + \Psi_{r\beta}^2} = \omega_r + \frac{L_m}{T_r} \times \frac{i_{s\beta}\Psi_{r\alpha} - i_{s\alpha}\Psi_{r\beta}}{\Psi_{r\alpha}^2 + \Psi_{r\beta}^2} \quad (3)$$

通过估计定子电压和电流的非线性关系, 可以得到转子转速 ω 为

$$\omega = f(u_{s\alpha}, u_{s\beta}, i_{s\alpha}, i_{s\beta}) \quad (4)$$

异步电动机的直接转矩控制系统具有非线性和强耦合性的特点, 直接采用PID进行控制难以获得较高的控制准确度, RBF神经网络无须了解系统的先验知识, 根据输入信号就可以对PID参数进行在线调整, 从而实现对异步电动机直接转矩的实时控制, 获得理想的控制结果。

异步电动机直接转矩控制策略

1. 系统的工作原理框图

改进的神经网络优化PID和模糊理论相融合的异步电动机控制系统的工作框架如图2所示。首先采用神经网络对异步电动机直接转矩的三个PID控制器参数进行实时、自适应调整, 并通过改进粒

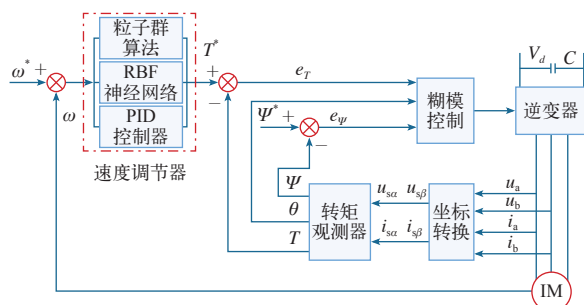


图2 异步电动机直接转矩控制系统的工作框架

子群算法优化神经网络参数; 然后利用模糊控制器替代异步电动机的滞环控制器; 最后实现对直接转矩的准确控制。

2. RBF神经网络

RBF神经网络由输入层、隐含层和输出层组成, $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 为输入矢量, $y = (y_1, y_2, \dots, y_p)$ 为网络输出矢量。输入层与隐含层之间是一种非线性映射关系; 隐含层与输出层之间是一种线性映射关系, 基函数通常采用高斯函数, 即

$$R_i(x) = \exp\left[-\frac{\|x - c_i\|^2}{2\delta_i^2}\right] \quad (5)$$

式中, c_i 为第 i 个基函数的中心; δ_i 为第 i 个感知的变量; $\|x - c_i\|$ 为 x 与 c_i 间的距离。

输出层函数为

$$y_k = \sum_{i=1}^m w_{ik} R_i(x) \quad k=1, 2, \dots, p \quad (6)$$

式中, w_{ik} 为权值。

采用RBF神经网络对异步电动机转矩的PID控制参数进行优化, RBF神经网络的结构如图3所示, 其输出层为PID控制器的3个参数: k_p 、 k_i 和 k_D 。

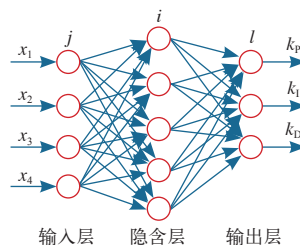


图3 RBF神经网络结构

3. 粒子群算法

粒子群优化算法是一种模拟鸟群找食的搜索算法, 粒子包括位置和速度两个矢量, 在求解过程中, 粒子根据个体和种群的经验调整自己前进的方向和速度, 具体为

$$v^{i+1}(i, k) = \omega v^i(i, k) + c_1 \text{rand}[p_{\text{best}}^i(i, k) - x^i(i, k)] + c_2 \text{rand}[g_{\text{best}}^i(i, k) - x^i(i, k)] \quad (7)$$

$$x^{i+1}(i, k) = x^i(i, k) + v^i(i, k) \quad (8)$$

式中, ω 为惯性权重; c_1 、 c_2 为学习因子; p_{best} 为粒子本身经历过的最好位置; g_{best} 为种群经历过的历史最好位置。

4. 神经网络优化PID控制器的具体步骤

采用RBF神经网络动态、实时调整PID控制器的框架如图4所示。该控制系统由PID控制器、RBF神经网络和粒子群算法模块三部分组成。

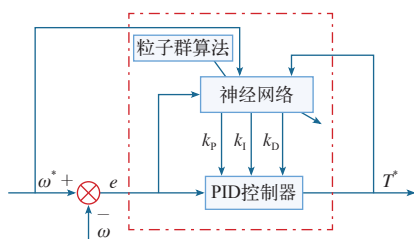


图4 RBF神经网络优化PID控制器

神经网络优化PID控制器的具体步骤如下：

- 1) 设置RBF神经网络结构以及相关的参数值。
- 2) 采集 ω^* 和 ω 并得到 $e(k)$ ，对 $\omega^*(i)$ 、 $T(i)$ 和 $e(i)$ 进行预处理。
- 3) 采用粒子群算法优化RBF神经网络参数。
- 4) 不断重复步骤3)直到控制准确度达到实际应用要求，输出最优的三个PID控制器参数 k_p 、 k_i 和 k_D 的值。

5. 设计模糊控制器

在本文设计的异步电动机转矩控制系统中，采用模糊控制器取代磁链、转矩控制器及开关选择表，对系统实现了高准确度控制，减小了磁链和转矩的脉动，保证了系统的稳定性和可靠性。模糊控制器的输入包括转矩偏差 e_T 、磁链偏差 e_ψ 及磁链角 θ ；模糊控制器的输出为逆变器的开关状态 V 。 e_T 、 e_ψ 和 θ 的隶属度函数分布如图5所示。

仿真实验

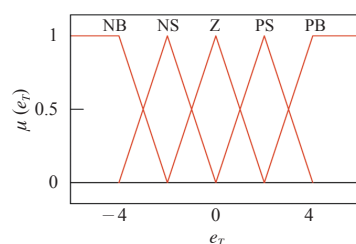
1. 仿真环境

为了测试本文提出的异步电动机直接转矩控制策略的性能，在Intel酷睿i5 4590 CPU、金士顿DDR3 1600 8GB及Windows 7操作系统的计算机上，采用Matlab 2012 工具箱进行仿真测试，选择传统的PID控制策略进行对比实验，并验证其优越性。

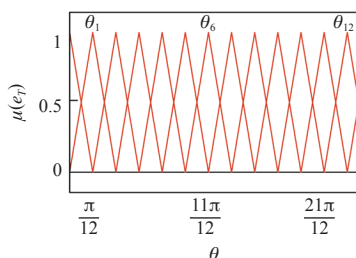
2. 结果与分析

(1) 转速响应曲线

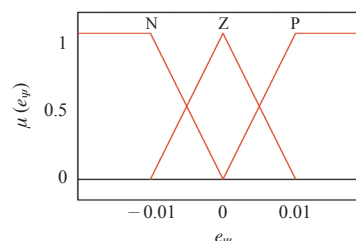
本文控制系统与传统控制系统的转速响应曲



(a) e_T 的隶属度函数



(b) e_ψ 的隶属度函数



(c) θ 的隶属度函数

图5 模糊控制器的隶属度函数

线对比如图6所示。从图6可以看出，相对于传统控制系统，本文控制系统的转速响应速度明显加快，而且超调量相对较小，调整时间急剧下降，系统鲁棒性更强。

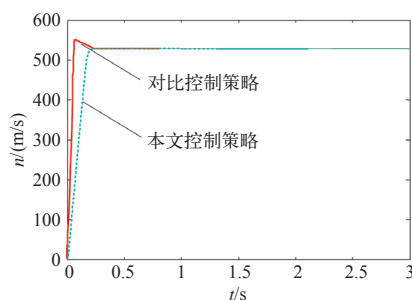


图6 与传统控制系统的转速响应性能对比

(2) 转矩响应曲线

本文控制系统与传统控制系统的转矩响应曲线对比如图7所示。从图7可知，当出现转矩突变时，传统控制系统的脉动很大；而本文控制系统的脉动较小，变化比较平稳，且很快达到了稳定状态，系统的抗干扰能力更强。

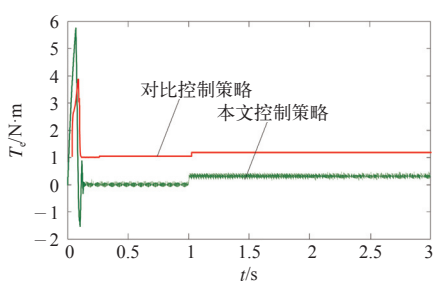
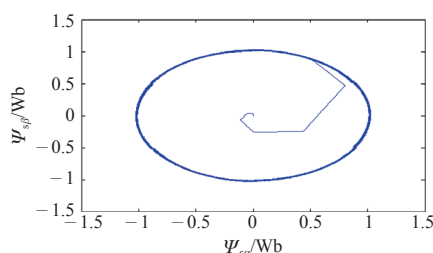


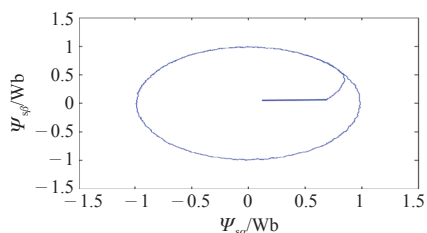
图7 与传统控制系统的转矩响应性能对比

(3) 定子磁链轨迹

本文控制系统与传统控制系统的定子磁链轨迹如图8所示。从图8可知，本文控制系统的定子磁链轨迹比较平滑；而传统控制系统的定子磁链轨迹出现了畸变，且畸变程度比较严重。对比结果表明，本文控制系统的控制准确度更高，且更加稳定、可靠。



(a) 传统控制系统的定子磁链轨迹



(b) 本文控制系统的定子磁链轨迹

图8 与传统控制系统的定子磁链轨迹对比

结束语

为了提高异步电动机系统的控制准确度，结合粒子群算法、RBF神经网络以及模糊理论的优点，提出一种新型的异步电动机直接转矩控制策略，利用全局搜索能力良好的粒子群算法优化神经网络参数，通过改进神经网络实时调节PID参数，并通过模糊控制改善系统的控制效果。实验结果表明，本文控制策略可以根据控制系统的时变性动态调系统参数，加快了系统

的响应速度，提高了系统的抗干扰能力，且稳定性更好。

参考文献

- [1] 刘鼎, 欧阳红林, 汪利峰. 权值自调整模糊PI在无刷直流电机中的应用 [J]. 计算机仿真, 2010, 27(4): 150-153.
- [2] 张广远, 刘文生, 王旭阳. 基于模糊神经网络的直接转矩控制系统研究 [J]. 电气传动, 2012, 42(6): 27-31.
- [3] Saberi H, Sharifian M B B. An improved direct torque control using fuzzy logic controllers and adaptive observer [C]. 2nd International Conference on Computer and Knowledge Engineering, 2012: 83-88.
- [4] 杨世勇, 徐国林. 模糊控制与PID控制的对比及其复合控制 [J]. 自动化技术与应用, 2011, 30(11): 21-25.
- [5] 林海, 严卫生, 李宏, 等. 基于BP神经网络和模糊控制的PMSM-DTC研究 [J]. 系统仿真学报, 2009, 21(5): 1403-1406.
- [6] 黄志峰, 胡育文, 高瑾, 等. 无刷直流电机仿真模型的建立与不同控制策略的仿真研究 [J]. 电机与控制应用, 2006, 33(9): 3-7.
- [7] 王占友, 谢顺依. 改进BLDC转矩性能的模糊控制器的设计 [J]. 电机与控制学报, 2009, 13(6): 913-918.
- [8] 韦啟宣, 尹华杰, 周恒. 无刷直流电机无传感器直接转矩控制研究 [J]. 微电机, 2012, 45(9): 61-66.
- [9] 谢春华, 汤宁平. 一种简化的永磁无刷直流电机直接转矩控制方法 [J]. 电工电气, 2012, 10(1): 14-17.
- [10] 殷云华, 郑宾, 郑浩鑫. 一种基于Matlab的无刷直流电机控制系统建模仿真方法 [J]. 系统仿真学报, 2008, 20(2): 293-298.
- [11] 仲伟堂, 彭弘. 一种新型异步电动机直接转矩控制系统 [J]. 微特电机, 2009, 18(6): 50-52.

(收稿日期: 2015-04-13) EA