基于无源性的异步电动机MRAC转速估算方法的改进

根据异步电动机的数学模型，基于无源性理论从能量的观点分析电动机控制系统，从中分离出无功力，简化了控制器的设计。同时在无速度传感器方面，针对传统模型参考自适应控制转速估算对参数敏感、易导致估算准确度低的不足，设计运用神经网络智能算法进行改进，以电动机为参考模型，保证参考模型准确无误，以神经网络为可调模型，降低对参数的敏感度。最后用Matlab搭建模型并仿真验证，神经网络算法改进的模型参考自适应方法能较好地辨识异步电动机的转速，具有良好的动态跟随性能，鲁棒性强。

王新友/甘肃广播电视大学
王腾飞/兰州交通大学自动化与电气工程学院

王新友/讲师

关键词/Keywords
异步电动机·
模型参考自适应控制·
神经网络·
无源性·

交流异步电动机是一种典型的非线性、强耦合且变量多的复杂系统，为了获得更好的动静态调速性能、抗干扰性能，其非线性控制策略得到了广泛深入的研究，主要方法[1]有：反馈线性化法、积分反步法、滑模变结构法和无源性控制法等。无源性控制是Romeo Ortega等人从机器人控制的研究中发展起来的[2]，与其他非线性控制策略相比，利用无源控制理论设计的系统控制器可实现系统的全局稳定性，无奇异点问题，参数变化及外来摄动有较强的鲁棒性。

在目前已提出的各种无速度传感器[3]转速估算方法中，共同的缺点需要准确的电动机参数，对参数依赖性强且敏感，本文提出利用神经网络算法进行改进。神经网络[4]智能算法具有良好的学习归纳、并行计算等优点，可以逼近任意连续非线性函数，结构简单、鲁棒性强，被广泛应用在模式识别、参数辨识及各种控制系统中。

广东省自然科学基金项目（S2013040013776）。

异步电动机的无源性分析

交流异步电动机在两相同步旋转dq坐标系中的Eular－Lagrange（EL）模型为

$$\boldsymbol{M}\dot{x}+\boldsymbol{C}(\omega_1,x)x+\boldsymbol{R}x+\boldsymbol{W}_d=\boldsymbol{u} \tag{1}$$

其中

$$x=\begin{pmatrix} i_{sd} & i_{sq} & i_{rd} & i_{rq} & \omega_r \end{pmatrix}^{\mathrm{T}} \tag{2}$$

$$\boldsymbol{M}=\begin{pmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m & 0 \\ L_m & 0 & L_r & 0 & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dfrac{J}{n_p} \end{pmatrix} \tag{3}$$

$$\boldsymbol{C}(\omega_1,x)=\begin{pmatrix} 0 & -\omega_s L_s & 0 & -\omega_s L_m & -C_1 \\ \omega_s L_s & 0 & \omega_s L_m & 0 & -C_2 \\ 0 & -\omega_s L_m & 0 & -\omega_s L_r & 0 \\ \omega_s L_m & 0 & \omega_s L_r & 0 & 0 \\ C_1 & C_2 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \tag{4}$$

$$\boldsymbol{R}=\begin{pmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & D \end{pmatrix} \tag{5}$$

$$\boldsymbol{W}_d=\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ T_L \end{pmatrix} \quad \boldsymbol{u}=\begin{pmatrix} u_{sd} \\ u_{sq} \\ u_{rd} \\ u_{rq} \\ 0 \end{pmatrix} \tag{6}$$

$$\begin{aligned} C_1&=n_p(L_s i_{sq}+L_m i_{rq}) \\ C_2&=-n_p(L_s i_{sd}+L_m i_{rd}) \end{aligned} \tag{7}$$

证明其无源性，对式（1）两边同乘

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

以x^{T}可得

$$x^{\mathrm{T}}\boldsymbol{M}\dot{x}=x^{\mathrm{T}}u-x^{\mathrm{T}}\boldsymbol{C}(\omega_1,x)x-x^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}x-x^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}_d \\ =x^{\mathrm{T}}u-x^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}_d-x^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}x \tag{8}$$

取正定二次型函数$H(x)=\frac{1}{2}x^{\mathrm{T}}\boldsymbol{M}x$，对式（8）两边积分可得

$$H[x(t)]-H[x(0)]=\int_0^t(x^{\mathrm{T}}\boldsymbol{u})\mathrm{d}\tau-\int_0^t(x^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}_d)\mathrm{d}\tau- \\ \int_0^t(x^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}x)\mathrm{d}\tau<\int_0^t(x^{\mathrm{T}}\boldsymbol{u})\mathrm{d}\tau \tag{9}$$

式中，左侧是异步电动机电气子系统t时刻能量的增量，右侧是外部电源给异步电动机供给的能量，根据无源性的定义，可知系统是严格无源的。同理可证机械子系统也是无源的。

异步电动机的电气和机械两个子系统均是无源的，因此其模型可以表示为电气和机械两个无源子系统负反馈并联的形式[5-6]。

电气子系统

$$\sum e:\begin{pmatrix}u\\-\omega\end{pmatrix}\mapsto\begin{pmatrix}i\\T_e\end{pmatrix} \tag{10}$$

机械子系统

$$\sum m:[T_e-T_L]\mapsto\omega \tag{11}$$

异步电动机电气与机械子系统负反馈并联图如图1所示。

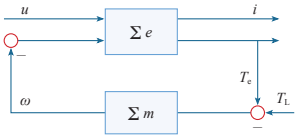

图1　异步电动机电气与机械子系统负反馈并联图

通过分解，可以把机械子系统作为电气子系统的无源干扰，只把电气子系统作为被控系统处理，因此简化了控制器的设计。本文设计的基于无源性的异步电动机无速度传感器调速系统如图2所示。

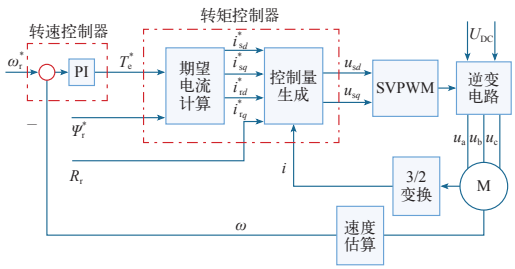

图2　基于无源性的异步电动机无速度传感器调速系统框图

基于神经网络的转速估算

1. 传统磁链的MRAC转速估算

基于磁链的模型参考自适应控制转速估算[7]（MRAC）是将不含角速度ω项的电压方程作为参考模型，将含有ω项的电流方程作为可调模型，利用方程输出磁链的差值构成自适应律来调节参数，以达到控制对象的输出跟踪参考模型的目的，如图3所示。

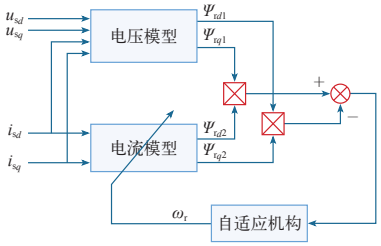

图3　磁链MRAC的原理框图

其关系为

$$\omega_{\mathrm{r}}=\left(K_{\mathrm{P}}+\frac{K_{\mathrm{I}}}{s}\right)(\Psi_{\mathrm{r}d2}\Psi_{\mathrm{r}q1}-\Psi_{\mathrm{r}q2}\Psi_{\mathrm{r}d1}) \tag{12}$$

式中，$\Psi_{\mathrm{r}d1}$、$\Psi_{\mathrm{r}q1}$为按电压方程计算的转子磁链；$\Psi_{\mathrm{r}d2}$、$\Psi_{\mathrm{r}q2}$为按电流方程计算的转子磁链。

2. 神经网络改进的MRAC转速估算方法

由于磁链MRAC的转速估算方法是建立在准确数学模型上的，对系统参数依赖较大，对参数变化较敏感，针对这些问题，本文采用神经网络智能算法对其进行优化，以电动机为参考模型，以神经网络为可调模型，在训练阶段调节其权值和偏置，直到误差达到预先设定的允许值内，然后用训练好的网络进行速度估计[8]，便可准确跟踪电动机实际转速，其原理如图4所示。

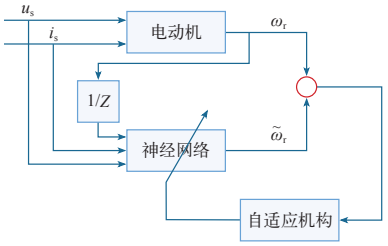

图4　神经网络改进MRAC转速估算原理图

本文采用的神经网络转速估算模型如图5所示，网络分为三层，其中输入信号为$u_{sd}(k)$，$u_{sq}(k)$，

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$i_{sd}(k)$，$i_{sq}(k)$，$\omega(k-1)$，隐层逼近函数选为tansig，输出层选为purelin，训练方法选为trainlm，设计好网络后，先对异步电动机模型的各个数据信号进行采样，以数组的形式存入工作空间，再利用得到的样本数据对神经网络进行训练，直到满足误差要求为止，然后用训练好的网络对转速进行估算。

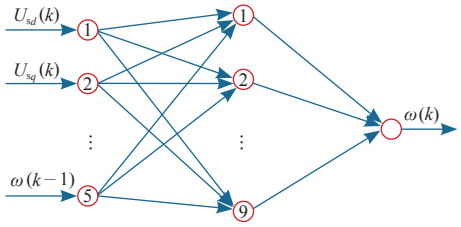

图5 神经网络转速估算模型图

仿真实验及分析

电动机仿真模型参数：额定电压$U^*=380$ V，50 Hz，$n_p=2$，$R_s=0.435$ Ω，$R_r=0.816$ Ω，$L_m=69$ mH，$L_s=L_r=76$ mH，转动惯量$J=0.2$ kg·m^2，期望磁链$\Psi_r^*=1.5$，期望转速1 350 r/min。

实验过程：在Matlab的仿真模块Simulink里分别搭建基于磁链MRAC系统和神经网络改进MRAC系统模型，在给定转速下空载起动，0.5 s时加负载60 N·m，0.8 s时降为20 N·m。

如图6所示，可以看出与电动机实际转速相比，基于磁链MRAC的转速估算，起动阶段和接近最大值时，估算误差较明显，加、减负载后系统鲁棒性变差，转速的估计值和实际值存在一定误差；神经网络改进的MRAC转速估算在起动阶段转速上升快速且平稳，略有超调，加、减负载后系统的鲁棒性比磁链MRAC模型强，稳态阶段时改进系统的表现更好。

结束语

本文研究了异步电动机无速度传感器的模型参考自适应控制转速估算方法，首先基于无源性建立电动机数学模型，简化了系统设计，得到无源控制率，其次针对传统模型参考自适应对参数变化较敏感等一些不足，运用神经网络智能算法加以改进，神经网络经过样本训练以后，具有对非线性系统辨识的能力，最后在Matlab里进行仿真实验验证，表明这种方法能较好地跟踪异步电动机转子转速，对系统参数变化具有较强的鲁棒性，证明了该设计方案是正确的。

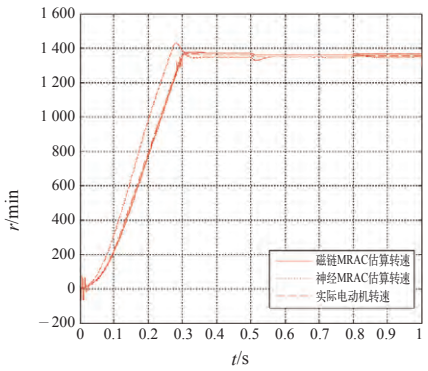

图6 电动机实际转速与两种估算方法的结果对比图

参考文献

[1] 程启明，程尹曼，王映斐，等．交流电机控制策略的发展综述 [J]．电力系统保护与控制，2001 (9)：145-154．

[2] Ortega R，Loria A，Nicklesson P，et al．Passivity-based control of eular-lagrange system [M]．New York：Springer，1998．

[3] 郑萍，王明渝．感应电机无速度传感器矢量控制的速度估算器研究 [J]．电工技术学报，2001，16 (5)：24-29．

[4] 张伟，黄进．基于神经网络的异步电机无速度传感器矢量控制 [J]．模式识别与人工智能，2000，13 (4)：478-481．

[5] 顾亮，沈传文，季筱隆．基于无源性的感应电机控制系统设计 [J]．电工电能新技术，2006，25 (3)：42-45．

[6] 张新华，戴先中．基于无源性的感应电机转矩与转速控制 [J]．电工技术学报，2001，16 (4)：34-37．

[7] 韩正之，陈彭年，陈树中．自适应控制 [M]．北京：清华大学出版社，2011．

[8] 徐小增，李叶松．基于神经网络的转子电阻在线辨识及补偿方法 [J]．电工技术学报，2002 (10)：35-37．

（收稿日期：2015－07－08）EA

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net