

基于 ARX 模型的笼型异步电机控制策略研究*

史建平¹, 张萌², 李渊¹

(1. 常州工学院 电气与光电工程学院, 江苏 常州 213032;

2. 河南牧业经济学院 智能制造与自动化学院, 河南 郑州 450000)

摘要: 针对笼型异步电机控制系统中时变、非线性的特点, 提出了以 ARX 模型为核心。模型参考自适应控制策略为基础的笼型异步电机的控制策略。所提出的控制策略对于电机参数变化和系统干扰具有较好的鲁棒性。通过仿真和样机试验, 对所提出的控制策略进行了验证。

关键词: ARX 模型; 笼型电机; 模型参考自适应; 异步电机

中图分类号: TM 301.2 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2018)05-0031-04

Research on Control Strategy of Squirrel Cage Induction Motor Based on ARX Model*

SHI Jianping¹, ZHANG Meng², LI Yuan¹

(1. School of Electrical and Photoelectronic Engineering, Changzhou Institute of Technology, Changzhou 213032, China;

2. College of Intelligent Manufacturing and Automation, Henan University Animal Husbandry and Economy, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: focusing on its time varying of parameters and nonlinear characteristics a Squirrel induction motor control strategy based on ARX model and model reference adaptive theory was proposed. The proposed control strategy had better robustness for the motor parameters time varying and system interference. The proposed control strategy was verified by the simulation and prototype experiment results.

Key words: ARX model; squirrel cage motor; model reference adaptive control (MRAC); induction motor

0 引言

交流变频传动具有宽调速范围、高稳速精度、快速动态响应及四象限运行等良好的技术性能, 笼型异步电机逐步采用交流变频调速方案^[1-3]。为了满足各种复杂工况条件下运行需求, 针对笼型异步电机调速系统, 学者展开了多角度的研究。主要体现在笼型异步电机的无速度传感器控制策略研究, 笼型异步电机参数辨识研究, 基于模糊控制、神经网络等方法的智能控制算法的研究^[4-5]。模型

参考自适应控制 (Model Reference Adaptive Control, MRAC) 最初是为航空设备自动驾驶而提出的。MRAC 控制技术已在航空航天设备自动驾驶、舰船自动驾驶和导引系统、光电随动系统、大型射电望远镜跟踪、机械臂和传动调速控制等方面广泛应用^[6-7]。近年来, 亦有学者将该控制理论成功应用于笼型电机的控制策略中^[8]。

本文针对笼型异步电机的应用背景, 结合 MRAC, 提出了基于 ARX (Auto Regressive eXogenous) 模型的控制策略。该控制策略一方面

* 基金项目: 江苏省科技计划项目 (BY2016031-06); 常州工学院自然科学基金项目 (YN1401)

作者简介: 史建平 (1965—), 男, 硕士, 副教授, 研究方向为电机控制。

李渊 (1979—), 男, 博士, 研究方向为电力电子与电气传动。

张萌 (1990—), 女, 硕士研究生, 研究方向为超声波电机控制技术。

利用 ARX 模型针对非线性模拟的优势,另一方面利用 MRAC 控制理论中参数不敏感的鲁棒性特征,提高电机控制品质和抗扰动性。

1 笼型异步电机调速系统模型

根据矢量控制原理,可以写出按转子磁链定向的同步旋转 dq 坐标系下的状态方程^[9],如式(1)所示:

$$\begin{cases} \dot{\omega}_r = \frac{pL_m}{JL_r}(\psi_{rd}i_{sq} - \psi_{rq}i_{sd}) - \frac{p}{J}T_L \\ \dot{\psi}_{rd} = -\frac{1}{T_r}\psi_{rd} + (\omega_1 - \omega_r)\psi_{rq} + \frac{L_m}{T_r}i_{sd} \\ \dot{\psi}_{rq} = -\frac{1}{T_r}\psi_{rq} - (\omega_1 - \omega_r)\psi_{rd} + \frac{L_m}{T_r}i_{sq} \\ \dot{i}_{sd} = -\frac{1}{T_s}i_{sd} + \omega_1 i_{sq} + \frac{1}{T_s}i_{sd}^* \\ \dot{i}_{sq} = -\frac{1}{T_s}i_{sq} + \omega_1 i_{sd} + \frac{1}{T_s}i_{sq}^* \end{cases} \quad (1)$$

- 式中: ω_1 ——电气同步角速度;
- ω_r ——转子电气角速度;
- i_{sd} 、 i_{sq} ——定子电流的直、交轴分量;
- i_{sd}^* 、 i_{sq}^* ——定子电流的直、交轴分量给定值;
- ψ_{rd} 、 ψ_{rq} ——转子磁链的直、交轴分量;
- p ——电机极对数;
- L_m ——电机互感;
- L_r ——转子电感;
- J ——电机转动惯量;
- T_L ——负载转矩;
- T_r ——电机转子时间常数;
- T_s ——电流滞后时间常数。

2 MRAC 基本原理

MRAC 系统具有多种结构形式。最为典型的 MRAC 结构如图 1 所示。该结构中包含参考模型、被控对象、参数可凋控制器和自适应机构等几部分。其中,参数可调的控制器由前馈和反馈环节共同组成,并且与被控对象一起构成 MRAC 系统的“内环”。由参考模型与自适应机构组成的自适应反馈回路,称作“外环”,该环自动调节内环中控制器的相关参数。

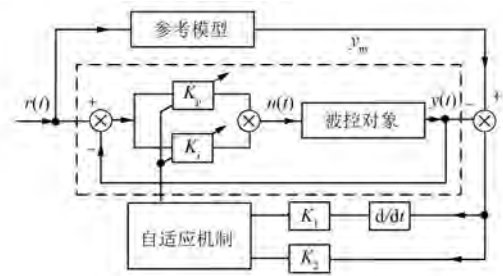


图 1 MRAC 基本原理

文中被控对象即笼型异步电机,参考模型由 ARX 构成,自适应机制用于调节变参数 PI 控制器,系统给定 r 为转速信号。

3 ARX 模型原理和实现

ARX 是时序分析法中具有代表性的方法,其中 ARX 模型可以用于“黑箱”模型的建模,可适用于线性系统和非线性系统模型辨识。该模型结构简洁,鲁棒性高。噪声强度会影响辨识精度,但亦可通过补偿的方式,提高在强噪声强度下的模型辨识精度。目前该模型已在多方面获得广泛应用。

3.1 ARX 模型原理

ARX 模型是时间序列模型方法中最基本、应用最广泛的一种,也是 ARX 模型方法的基础,一般可以表达为

$$y(t) = a_1y(t-1) + \dots + a_{n_a}y(t-n_a) + \xi(t) \quad (2)$$

式中: $y(t)$ ——系统输出量;

$a_i (i=1, 2, \dots, n_a)$ ——系统回归系数用参数,用于描述某 i 个输出量对当下系统输出的影响;

n_a ——系统回归的阶次,用于描述其对当下系统输出的影响;

$\xi(t)$ ——系统的白噪声信号。

在实际工程使用中,更多的是使用在此基础上改进的 ARX 模型,即加入外部产生的控制量(exogenous)。因此改进后的模型可以表示为

$$y(t) = a_1y(t-1) + \dots + a_{n_a}y(t-n_a) + b_1u(t-1) + \dots + b_{n_b}u(t-n_b) + \xi(t) \quad (3)$$

式中: $u(t)$ ——系统输入量;

$y(t)$ ——系统输出量。

为了更好地描述系统的非线性特性,在使用该模型时中,将其扩展为非线性模式的 ARX 模型,即

$$y_p(t) = f[y(t-1), y(t-2), y(t-3), \dots, u(t), u(t-1), \dots] \quad (4)$$

在此将加权求和的计算方法,改进为某种非线性映射函数来进行描述,即 f 为非线性函数,其输入是系统中的回归因子。因此,为了更好地辨识系统的非线性,可以采用多种非线性映射函数。非线性 ARX 模型结构如图 2 所示。

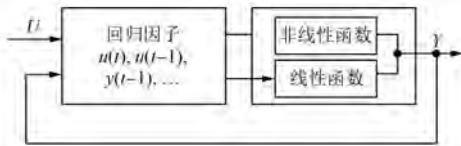


图 2 非线性 ARX 模型结构

3.2 ARX 模型辨识实现

笼型电机辨识数据来源于课题组相关试验平台。样机控制平台驱动部分采用常规的三相两电平逆变器,采用空间矢量脉宽调制控制,控制器采用 DSP+CPLD 构架,其中 DSP 用以控制算法编制,CPLD 用以信号调理。转速控制器采用 PI 控制。通过调节给定转速和 PI 参数,共获得 20 组包含输入给定和转速输出的数据,其中 15 组数据用于笼型电机建模,其余 5 组用以辨识模型检测。建模过程在 MATLAB 工具软件下完成。在 MATLAB 软件 Ident 工具箱中,关于 ARX 模型辨识方法有 S 型神经网络、小波神经网络、二叉树神经网络和 RBF 神经网络 4 种方法。文中采用小波神经网络予以实现。

小波神经网络辨识如表 1 所示,描述了在不同回归因子情况下,利用小波神经网络对笼型异步电机的模型辨识结果。其中,Reg(u)指基于输入量的回归因子数量,Reg(y)是指基于输出量的回归因子数量。例如 Reg(u)=2、Reg(y)=2 时,系统当前输出值的构建,使用了 $u(t-1)$ 和 $u(t-2)$,以及 $y(t-1)$ 和 $y(t-2)$ 。当回归因子取其他值时,依次类推。从表 1 可以看出,回归因子设置影响系统辨识结果。总体来说,随着基于输入和基于输出的回归因子数量变大,辨识精度越高,但当两者数量大于 3 后,辨识精度变化不再明显,其

中小波神经元数量设为 10 个。ARX 辨识模型输出如图 3 所示,描述了在获得辨识结果后,对其加以同样的控制量,所产生的输出波形。

表 1 小波神经网络辨识

序号	匹配率/%	FPE	Loss Fcn	Reg(u)	Reg(y)
1	91.3	9.42	9.22	1	1
2	91.6	8.77	8.76	1	2
3	92.0	8.40	8.31	2	1
4	92.8	7.86	7.51	2	2
5	91.2	9.63	9.69	3	1
6	93.1	7.45	7.21	3	2
7	94.5	6.51	6.33	3	3
8	94.6	6.36	6.21	4	4
9	94.6	6.33	6.23	5	5

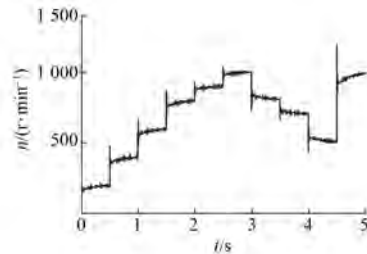


图 3 ARX 辨识模型输出

图 4 为针对辨识获得的模型施以给定转速为 1 200 r/min 的阶跃响应曲线。辨识数据中没有该给定转速,可以看出针对新的控制量,辨识模型可以稳定,但动态性能一般。

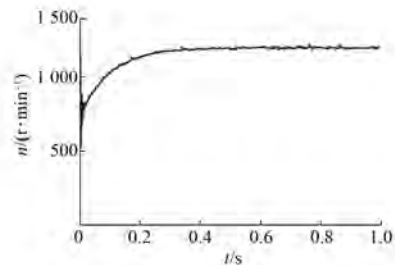


图 4 ARX 辨识模型阶跃输出

4 基于 ARX 的笼型电机 MRAC 控制

如图 1 中基本原理所示,参考模型采用利用试验数据辨识获得的 ARX 模型。图 1 中控制器采用常规的 PI 控制,给定信号通过参考模型生成参考模型输出 y_m ,该值与实际输出信号的偏差作

为模糊自适应机构的输入;该偏差值经过一个微分环节,形成偏差的微分信号;偏差微分信号和偏差值分别经过两个作用系数 k_1 和 k_2 ;模糊自适应控制将根据偏差信息对 PI 的比例和积分系数进行调节,从而实现 MRAC。

文中采用模糊控制自适应方法。这里将参考模型输出与实际被控对象输出的偏差记为 e ,该偏差的微分值写作 e_c 。建立一个两输入、两输出的模糊控制器,则控制器的偏差 e 和偏差微分 e_c 作为控制器的两个输入,其隶属度函数可以表示为图 5 所示;模糊控制器输出 1 是对 PI 控制器比例环节的修正值 k_p ,输出 2 是 PI 控制器积分环节的修正值 k_i 。其隶属度函数如图 6 所示。

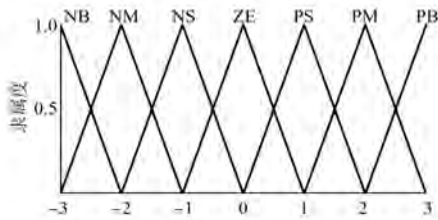


图 5 输入 e 和 e_c 的隶属度函数

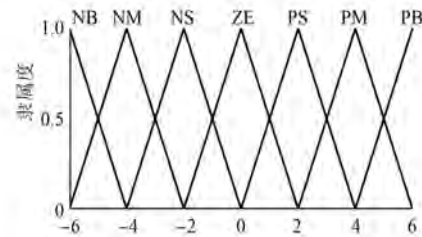
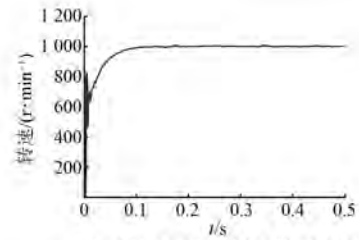


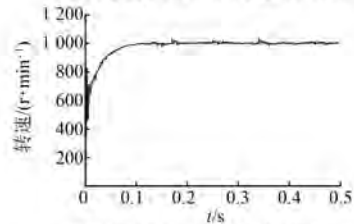
图 6 输出 k_p 和 k_i 的隶属度函数

基于上述控制策略,利用 MATLAB 工具软件对控制系统进行仿真。笼型异步电机参数如下:电机额定电压 380 V,电机极对数 $p=2$ 、定子电阻 $R_s=0.433 \Omega$,定子电感 $L_s=0.0021 \text{ H}$,转子电阻 $R_r=0.820 \Omega$,转子电感 $L_r=0.002 \text{ H}$,电机互感 $L_m=0.007021 \text{ H}$,转动惯量 $J=0.088 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 。

阶跃给定定为 1 000 r/min 情况下,电机转速输出仿真曲线如图 7(a) 所示。图 7(b) 为同一阶跃给定情况下,人为模拟扰动时的响应曲线。电机转子电阻在 0.15 s 时突降 20%,0.25 s 时转子电阻上升 10%,0.33 s 时负载由额定下降至 70%。从电机转速输出仿真曲线可以看出,采用 ARX 模型的 MRAC 控制总体效果良好,阶跃响应超调由



(a) 无扰动下阶跃转速阶跃响应



(b) 扰动下阶跃转速阶跃响应

图 7 阶跃速度响应

原系统的 50% 下降到 5% 以内,调节时间由原系统的 0.6 s 下降到约 0.1 s,稳态误差由原系统的 5% 下降到 2% 以内。

5 试验验证

将上述控制方法,在样机平台上进行编程测试,样机相关参数如前面所述。试验曲线如图 8 所示。图 8 中 CH1 为转速给定,CH2 为转速响应,CH3 为定子电流无功分量,CH4 为定子电流 A 相曲线。CH1~CH2 曲线是将 DSP 中数据通过 DA 连接示波器予以给出,CH4 是电流实测值。

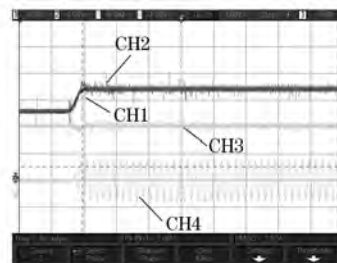


图 8 试验验证波形

6 结语

构造了以 ARX 为参考模型的 MRAC 笼型异步电机控制策略。通过仿真和试验验证,表明了控制策略正确有效,控制系统具有较好的抗干扰性能和良好的动态性能。

(下转第 66 页)

机转子基本采用点浇口压铸工艺,根据卧式压铸机的铸铝能力,模具可以设计为一模多腔,生产效率较高。

叠压好的转子铁心采用卧式铸铝工艺,需要配置多根假轴和斜键,以保证转子斜槽度和铸铝后转子的推出,转子铁心外圆无需精车,跳动达到 0.05~0.06 mm,基本符合设计图纸要求。

采用气隙直接冲制工艺,转子表面不再进行车削加工,故对转子铁心的加工精度要求应适当提高,同时还需控制好铸铝工艺的模温、铝温、压射速度和比压,以保证电机定转子铁心的气隙均匀度、同心度和铸铝质量。

4 冲气隙工艺在低压高效电机中的应用实例

对于电机定转子间的气隙采用直接冲制的工艺方法,我们与相关企业合作,在小电机加工工艺方面进行了有益的尝试。试制了 2 台 H100L1-4 样机。2 台样机实测的杂散损耗值与采用常规车转子外圆的 2 台普通电机的杂散损耗值对比数据

情况,如表 1 所示。

表 1 冲气隙工艺与普通工艺杂耗值对比

类别	杂散损耗实测值/W
2 台采用冲气隙工艺样机	18.9、17.1
普通常规电机	38.6、42.4

由表 1 的对比数据可知,2 台采用气隙直接冲制样机的杂散损耗值有明显降低。

5 结 语

由以上分析和对比试验数据可知,定、转子气隙采用直接冲制的工艺方法,不仅可应用于高压电机铜排转子加工,也可应用于低压小电机的转子加工。该工艺对提高高、低压高效电机的效率、降低温升和杂散损耗,是一种良好的新方法。

【参考文献】

[1] 汤惠明.高压高效电机铜排转子制造中的冲槽切气隙工艺[J].电机技术,2015(4): 29-30.
收稿日期: 2017 -12 -12

(上接第 34 页)

【参考文献】

[1] 韩耀飞.MW 级异步电机双三电平变频系统研究 [D].徐州:中国矿业大学,2010.
[2] 何晓群.矿井提升机调速和控制系统的展[J].工矿自动化,2009,35(7): 22-25.
[3] 陈伯时.电力拖动自动控制系统[M].北京:机械工业出版社,2004.
[4] 孟兆博.基于 MRAS 异步电机无速度传感器矢量控制系统的研究[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2010.
[5] MAES J, MELKEBEEK J A. Speed-sensorless direct torque control of induction motors using an adaptive flux observer [J]. IEEE Transactions on Industry

Application,2000,36(3): 212-220.
[6] 李剑飞,尹泉,万淑芸.基于扩展卡尔曼滤波器的异步电机转速辨识[J].电工技术学报,2002,17(5): 40-44.
[7] 苏位峰,刘丛伟,孙旭东,等.一种基于 Kalman 滤波的异步电机转速控制器[J].清华大学学报(自然科学版),2003,43(9): 1202-1205.
[8] 任振华.基于模型参考自适应的异步电机转子电阻辨识[D].北京:北京交通大学,2012.
[9] 梅丛立,黄文涛,殷开婷,等.基于 Hammerstein 模型的感应电机变频器调速系统神经网络控制[J].控制与决策,2015,30(6): 1148-1152.
收稿日期: 2017 -09 -27

欢迎投稿 欢迎订阅 欢迎刊登广告