

文章编号: 1673- 9620 (2008) 01- 0032- 05

模糊控制理论在电动机软启动中的应用^{*}

朱正伟¹, 蒋建明¹, 张锁龙², 宋瑞宏², 倪新跃³

(1 江苏工业学院 信息科学与工程学院, 江苏 常州 213164; 2 江苏工业学院 机械与能源工程学院, 江苏, 常州 213016;
3. 吴江市江达输送机械制造有限公司, 江苏 吴江 215217)

摘要: 针对异步电动机启动过程的特点, 提出了应用于电动机软启动控制的带加权因子插值模糊控制方法, 它既能自适应参数的变化, 又能克服输出模糊量变化时控制量的跳变, 同时其算法简洁, 易于在 PLC 等一般工业计算机上实现。实践表明, 该控制方法具有响应快、超调小、稳态精度高和自适应能力强等特点, 完全满足电机软启动要求。

关键词: 模糊控制; 加权因子; 插值; 软启动

中图分类号: TP 273

文献标识码: A

Application of Fuzzy Control Theory to the Soft Starting of Induction Motor

ZHU Zheng-wei¹, JIANG Jian-ming¹, ZHANG Suo-long², SONG Rui-hong², NI Xin-yue³

(1. School of Computer Science and Engineering, Jiangsu Polytechnic University, Changzhou 213164, China; 2. School of Mechanical and Energy Engineering, Jiangsu Polytechnic University, Changzhou 213016, China; 3. Wujiang Jiangda Manufactory Co., Ltd., Wujiang 215217, China)

Abstract: This paper puts forward a kind of interpolation fuzzy algorithm with weighting factors applied in induction motor intelligent soft starter according to the characteristics of the induction motor startup process. It is not only able to adapt itself to variable parameters automatically, but also keep the output of control system from changing suddenly when the fuzzy output changes. Its simple calculation is easy to be carried out on ordinary industrial computers. Practice suggests that this control theory presents a rapid response, a small overshoot, a delicate stability and a superior adaptability, which could fully satisfy the requirements of the electromotor soft starting process.

Key words: fuzzy control; weighting factors; interpolation; soft starting

目前, 交流异步电动机以结构简单、运行可靠、过载能力强、效率较高和价格低廉等优势, 在工矿企业中被广泛应用。但是由于交流电动机的结构特点, 使其启动性能不是很完美, 它在启动时具有较大的启动电流、较小的启动转矩和较大的转动

惯量, 这些特点使交流异步电动机带负载能力下降, 容易发生过载损坏。同时过大的启动电流也会给供电电网带来很大的电流冲击, 导致电网的供电质量下降, 影响电网其他用电设备的正常运行, 特别是容量较大的异步电动机出现这种情况会造成更

^{*} 收稿日期: 2007- 11- 05

基金项目: 江苏省科技攻关项目 (BE2006104)

作者简介: 朱正伟 (1963-), 男, 江苏武进人, 工学博士, 教授, 主要研究方向为测控系统和智能仪器。

为严重的后果。为提高电动机与电网的运行质量，常采用软启动装置来改善电动机的启动性能。

软启动是实现电动机启动电流的平稳上升，且在整个启动过程中，没有加速度突变，以最大限度地减小起动惯性力和启动冲击作用，提高系统运行稳定性。传统方法是采用闭环 PID 控制对电动机进行恒流软启动，但电动机启动过程中的电流和晶闸管调压电路的控制电压之间的数学模型很难确定，而且异步电动机又是一个高阶非线性的被控对象，所以 PID 控制很难得到理想的效果。

模糊控制利用隶属函数和模糊合成法则思想，巧妙地综合了人们的直觉经验，模拟人的思维决策过程来选择控制规则和策略，从而基本上摆脱了对控制对象数学模型的依赖性。它以其简洁性赢得了高的可靠性，以其并行运算加快了控制的响应速度，以其单个规则的独特性，抵消了个别规则的响应误差对全局的影响程度，使整个系统的抗误差能力增强，鲁棒性增强。但目前它的算法还不是很丰富，而且已有的算法也大多有其局限性，有的算法虽然简单易行，但其控制规则在对象参数随环境变化而发生漂移时就不能进行有效的调整，难以收到很好的控制效果^[1]。而另外一些高性能的模糊控制算法，如有自组织、自学习功能的控制算法，由于算法复杂，运算量大且占用存储空间多，如果采用 PLC 等控制计算机，其存储容量和计算速度都无法满足实时控制的需要。本文在研究了软启动和模糊控制的特点后，提出了应用于电动机软启动控制的带加权因子的插值模糊控制方法，对模糊控制策略的实现进行了分析设计。经实践证明，这种方法可以很好地实现电机启动时启动电流平稳上升和系统稳定运行，而且，其算法运算量小，完全能够在普通的 PLC 上加以实现。

1 软启动的工作原理

交流异步电动机工作时，其电流与定子上的电压成正比，因此对启动电流的限制可以通过控制定子电压实现，而电压的控制可以由移相触发器通过

控制晶闸管的导通角来实现。软启动控制原理如图 1 所示^[2,3]。晶闸管双相调压电路采用晶闸管智能模块 ITPM，所谓 ITPM，是将晶闸管主电路和移相触发电路以及具有控制功能的电路封装在同一外壳内的新型模块，该模块在体积、容量、功能、可靠性以及智能化程度等方面与传统同类装置相比都有很大优势。启动初始，交流接触器 KM2 断开，KM1 闭合。交流电机定子电流滤波后与启动电流给定值一起作为模糊控制器的输入信号，通过模糊控制算法控制晶闸管的导通角，使电动机实现平滑启动。启动完成后，PLC 发出信号，交流接触器 KM1 断开，KM2 闭合，切除晶闸管调压装置，电动机进入正常的工作状态，软启动过程结束。

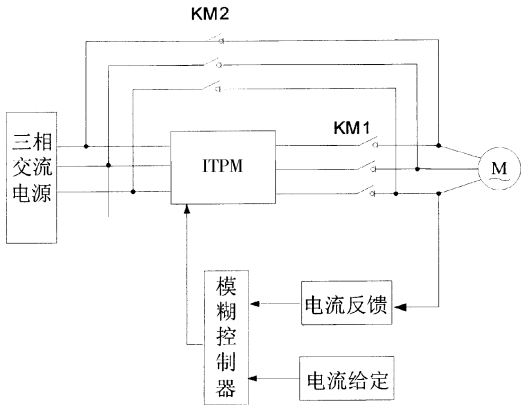


图 1 交流电动机软启动控制原理图

Fig 1 Soft starting control circuit of induction motor

2 模糊控制器设计

2.1 结构选择

考虑到系统准确性和快速性要求，本文采用二维模糊控制器，将电流偏差 e 和电流偏差的变化率 Δe (de/dt) 作为其输入变量，以晶闸管移相触发器的控制电压 u 作为其输出变量。这种结构已能够比较严格地反映受控过程中输入变量的动态特性，可满足绝大部分工程需要，而且模糊控制规则容易理解。其原理框图如图 2 所示^[4]。

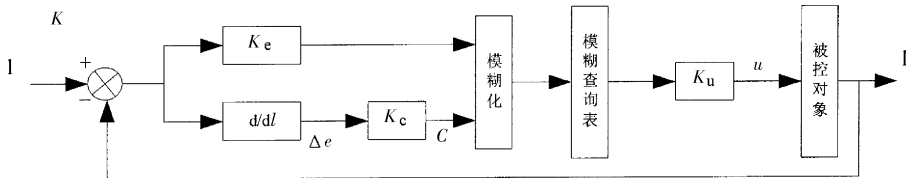


图 2 模糊控制器结构图

Fig 2 Structure of fuzzy control

图 2 中, I 为启动电流设定值, I^* 为反馈电流测量值, K_e 为输入偏差的量化因子, K_c 为输入偏差变化的量化因子, K_u 为输出量的量化因子。

2 2 语言变量的确定及隶属函数的选取

取电流偏差的模糊语言变量为 E , 电流偏差变化率的模糊语言变量为 C , 模糊控制器控制输出的模糊语言变量为 U , 其模糊集合分别表示为

$T(E) = \{ \text{负大 (NB)}, \text{负中 (NM)}, \text{负小 (NS)}, \text{零 (ZE)}, \text{正小 (PS)}, \text{正中 (PM)}, \text{正大 (PB)} \}$

$T(C) = \{ \text{负大 (NB)}, \text{负中 (NM)}, \text{负小 (NS)}, \text{零 (ZE)}, \text{正小 (PS)}, \text{正中 (PM)}, \text{正大 (PB)} \}$

$T(U) = \{ \text{负大 (NB)}, \text{负中 (NM)}, \text{负小 (NS)}, \text{零 (ZE)}, \text{正小 (PS)}, \text{正中 (PM)}, \text{正大 (PB)} \}$

依据模糊控制原理, 对输入输出值量化, 并把量化值模糊化, 各变量的论域选取为

$E = \{-6, +6\}$; $C = \{-6, +6\}$; $U = \{-6, +6\}$ 。

根据启动时需要既减小启动电流又增大启动转矩的原则, 对于本文的 3 个论域中各模糊子集都采用等腰三角形隶属函数来描述, 如图 3 所示。

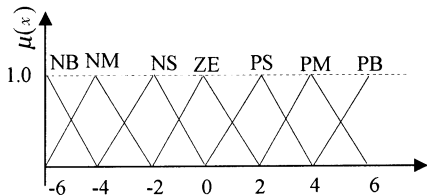


图 3 论域 E 、 C 和 U 上各模糊子集隶属函数图形

Fig 3 Membership function of every fuzzy subset in universe E , C and U

通过隶属函数可方便地求得输入语言变量赋值表, 利用输入语言变量赋值表及模糊控制规则, 通过拉森推理法则, 可得到一个模糊控制查询表, 如表 1 所示^[5]。

2 3 带有多加权因子的控制规则

模糊控制器的控制规则是根据手动控制策略制定的, 它依赖于实践经验和技术知识。这里采用模糊条件语句归纳手动控制的过程。例如

If $E = \text{PM}$ and $C = \text{PS}$ Then $U = \text{NB}$

其相应模糊关系为 $R = E \times C \times U$ 。

表 1 模糊控制查询表

Table 1 Query of fuzzy control

U	E						
	- 6	- 4	- 2	0	2	4	6
C	- 6	R_0	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5
	- 4	R_7	R_8	R_9	R_{10}	R_{11}	R_{12}
	- 2	R_{14}	R_{15}	R_{16}	R_{17}	R_{18}	R_{19}
	0	R_{21}	R_{22}	R_{23}	R_{24}	R_{25}	R_{26}
	2	R_{28}	R_{29}	R_{30}	R_{31}	R_{32}	R_{33}
	4	R_{35}	R_{36}	R_{37}	R_{38}	R_{39}	R_{40}
	6	R_{42}	R_{43}	R_{44}	R_{45}	R_{46}	R_{47}

为了满足系统在不同状态下的要求, 提高控制性能, 这里引入带加权因子的模糊控制规则, 其解析表达式为

$$U = \alpha E + (1 - \alpha) C \quad (1)$$

式中: α 为加权因子。通过调整 α 的大小, 可以改变偏差和偏差变化率对输出控制量的加权程度, 这种带加权因子的模糊控制器在一定程度上对查询表方法进行了改进, 但是, 对于这种单加权因子方法, 控制规则只依赖一个参数 α , α 值一旦选定, 在整个控制过程中就不能改变了。但是, 对于式 (1) 所表示的二维模糊控制系统, 在不同的状态下, 对控制规则中的 E 及 C 的加权程度有不同的要求。

电动机启动初始阶段, 启动电流的误差往往较大, 对软启动所对应的二维模糊控制系统而言, 其主要目的是消除误差, 这时希望电流误差值 E 在控制规则中的加权应该大些, 即 α 的取值应大些; 相反, 当误差较小时, 系统已接近稳定, 应尽快使系统稳定下来, 防止超调, 这就要求在控制规则中, 增加电流误差变化值 C 的加权系数, 即 α 的取值应小些。这些要求仅靠一个固定的加权因子是难以实现的, 因此需要针对不同等级的误差引入不同的加权因子, 以此实现对模糊规则的自调整。

根据以上分析, 本文采用的带多个加权因子的控制规则可表示为

$$U = \alpha_0 E + (1 - \alpha_0) C, E = 0$$

$$U = \alpha_1 E + (1 - \alpha_1) C, E = \pm 1, \pm 2$$

$$U = \alpha_2 E + (1 - \alpha_2) C, E = \pm 3, \pm 4$$

$$U = \alpha_3 E + (1 - \alpha_3) C, E = \pm 5, \pm 6$$

采用加权因子自寻优算法, 首先根据实际问题 and 经验数据初选一组加权因子: $\alpha_0 = 0.40$, $\alpha_1 = 0.50$, $\alpha_2 = 0.60$, $\alpha_3 = 0.70$, 目标函数取为

$$M = \min \int_0^\infty t |e(t)| dt \quad (2)$$

采用单纯形法寻优, 最终得到使 M 最小的最

优加权因子 $\alpha_0^* = 0.37$, $\alpha_1^* = 0.52$, $\alpha_2^* = 0.68$, $\alpha_3^* = 0.81$ 。为了减轻 PLC 运算负担, 可以使控制表离线生成, 在离线计算的基础上, 将在这组加权因子作用下对应的模糊控制规则存放在内存中, 建立模糊控制表, 运行过程中采用查表法进行处理。

2.4 插值算法

在模糊控制器中使用插值算法, 相当于使模糊论域的分档数趋于无穷大。这样不仅能够满足控制规则表所指定的控制规则, 而且还在控制规则表内的相邻分档之间以插值方式补充了无穷多个新的、经过细分的控制规则, 更加充实完善了原来的控制规则, 从根本上消除了量化误差和调节死区, 克服了由于量化误差引起的稳态误差和稳态颤振现象, 可以进一步改善系统性能。

由于电机软启动的控制特点是控制周期短, 实时性要求高, 因此可采用直接对模糊控制查询表进行线性插值的方法, 其插值公式如式 (3) 所示^[6,7]

$$Y(X) = Y_i + (Y_{i+1} - Y_i) \frac{X - X_i}{X_{i+1} - X_i} \quad (3)$$

其中, 假设 X_i 、 X_{i+1} 是相邻两自变量的模糊值; Y_i 、 Y_{i+1} 是与之对应的因变量模糊值, 则可将 $\frac{X - X_i}{X_{i+1} - X_i}$ 看作是 X 对 X_{i+1} 的隶属度, 如式 (4) 所示

$$A_{i+1}(X) = \frac{X - X_i}{X_{i+1} - X_i} \quad (4)$$

于是, 式 (3) 可变为

$$Y(X) = Y_i + (Y_{i+1} - Y_i) A_{i+1}(X) \quad (5)$$

对于如表 1 所示的控制量表, 设两输入变量的量化值 $E(t) \in [E_i, E_{i+1}]$, 而 $C(t) \in [C_j, C_{j+1}]$, 则控制量 $U(t)$ 可根据式导出的如下插值法而计算出来

$$U_1(t) = U_{ij} + (U_{i+1,j} - U_{ij}) A_{i+1}(E) \quad (6)$$

$$U_2(t) = U_{i,j+1} + (U_{i+1,j+1} - U_{i,j+1}) A_{i+1}(E) \quad (7)$$

$$U(t) = U_1(t) [U_2(t) - U_1(t)] A_{j+1}(C) \quad (8)$$

$$\text{式中: } A_{i+1}(E) = \frac{E(t) - E_i}{E_{i+1} - E_i}, \quad A_{j+1}(C) = \frac{C(t) - C_j}{C_{j+1} - C_j}。$$

3 软启动器的软硬件设计

3.1 硬件设计

以 S7200PLC 作为控制系统的核心部件, 配以必要的外围电路共同构成控制回路。采用电霍尔传感器和 s7-200PLC 的 A/D 转换模块完成电流的采样, 其采样到的电流值与设定的启动电流限定值相比较, 通过模糊算法, 利用 s7-200PLC 的 D/A 转换模块, 控制晶闸管交流调压电路的输出电压。其硬件结构框图如图 4 所示。

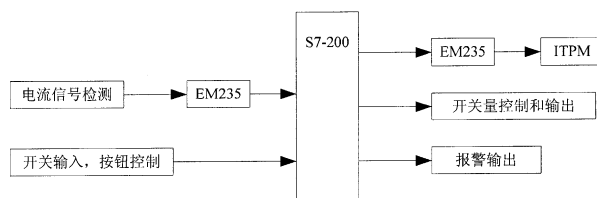


图4 软启动器硬件结构框图

Fig 4 Hardware circuit of soft starting

系统模拟量输入输出模块选用 EM 235, 它具有 12 位的分辨率和多种输入/输出范围, 能够不用外加放大器而与传感器和执行器直接相连, 可以用 DIP 开关设置 EM 235 模块的模拟量输入范围和分辨率。

晶闸管智能模块 ITPM 选用 MJZKS-JL-350 型, 模块内的移相触发电路对来自电网的同步信号进行整形、限幅并和触发信号电平相比较, 产生触发方波脉冲, 由高频振荡器对触发方波完成调制和脉冲再分配, 通过功放电路对其进行功率放大后触发晶闸管。移相触发电路封装在晶闸管模块内, 只需从外部输入一个 0~10 V 的交流控制信号, 即可改变晶闸管的触发角, 实现电压的调节。

3.2 软件设计

系统软件采用模块化程序设计, 由主程序统一调用, 首先在 PLC 存储器中建立模糊规则查询表, 并将量化因子置入 PLC 存储器中, 然后利用其 A/D 模块将输入量采集到 PLC 中, 利用其 D/A 模块输出信号控制晶闸管智能模块 ITPM, 控制模糊控制策略程序设计流程如图 5 所示。

4 实验结果

在一台额定功率为 2.2 kW 的异步电动机上进行启动实验, 电动机的性能参数为: 额定电压 380 V, 额定电流 4.5 A, 频率 50 Hz, 转速 1430 r/min, 给定相同倍数的启动电流, 分别采用 PID 控制和本文提出的带多个加权因子的插值模糊

控制方法进行启动实验。电机软启动过程的电流有效值变化如图 6 所示。从图中可以看出,带多个加权因子的插值模糊控制方法在超调量、运行平稳性及响应快速性等方面的性能都明显优于 PID 控制,消除了 PID 控制时常见的振荡现象,实现了良好的启动性能。

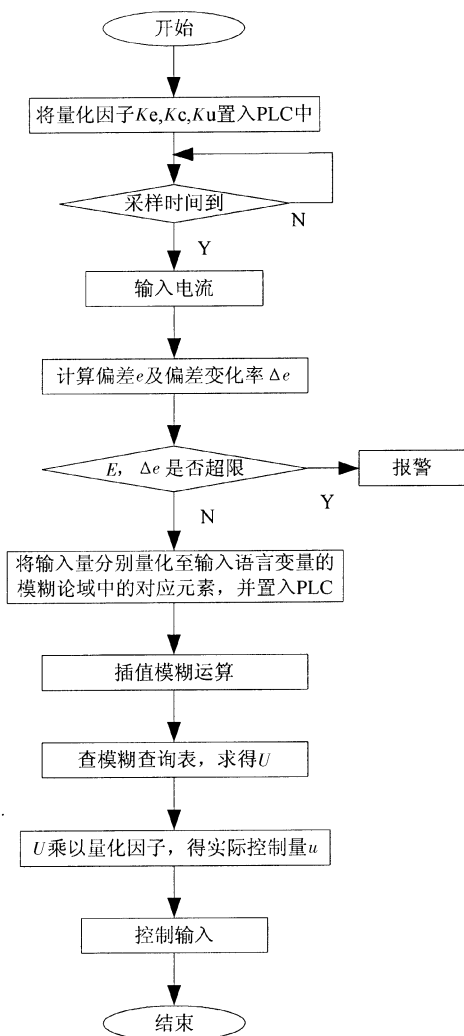


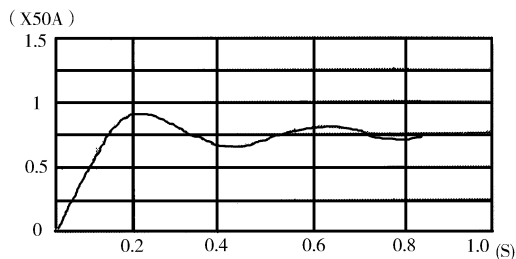
图 5 模糊控制策略程序流程图

Fig 5 Flow- chat of fuzzy control strategy

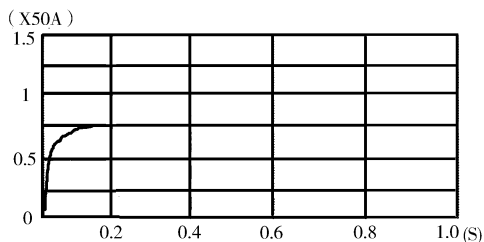
5 结 语

本文提出的带多个加权因子的插值模糊控方法利用 S7- 200PLC 实现的异步电动机软启动器, 具有控制简单、运行平稳可靠等优点, 提高了软启动器的智能化程度。采用离线计算在线查询的方法, 将复杂的模糊控制计算融进查询表中, 在实际控制中大大节省了计算时间, 使控制算法得到简化。该方法有效地解决了异步电动机, 尤其是大容量异步电动机在启动时出现的过大冲击电流。该软启动器

已成功应用于吴江市江达机械制造有限公司的“全封闭自清式智能化长距离大吨位双气垫带式输送机”的传动系统中, 能使带式输送机平稳启动, 且在整个启动过程中加速度的最大值较小, 没有加速度突变, 最大限度地减小了启动惯性和启动冲击作用, 这样可延长输送带的使用寿命、降低输送带的强度等级。利用 PLC 和多加权因子的模糊控制方法实现的电机软启动装置, 既保留了 PLC 控制系统控制可靠、灵活、适应能力强等特点, 又大大提高了装置的智能化程度, 具有广泛的应用前景。



(a) PID 控制软启动的电流变化过程



(b) 模糊控制软启动的电流变化过程

图 6 电机软启动过程的电流变化

Fig 6 Current tend in soft starting of induction motor

参考文献:

- [1] Gurkan Zenginobuz, Isik Cadirei, Muammer Ermis. Soststarting of large induction motors at constant current with minimized starting torque pulsations [J]. IEEE Trans Ind Appl, 2001, 37 (5): 334- 347.
- [2] 张雪平. 单片机在交流电动机软启动中的应用 [J]. 工矿自动化, 2005, 8: 17- 19.
- [3] 高庆华, 王福忠, 苏波. 基于模糊控制和 80C196KC 的电动机软启动器设计研究 [J]. 矿山机械, 2005, 9: 85- 87.
- [4] 李南, 张德强. 基于 S7- 200PLC 的模糊控制研究 [J]. 辽宁工学院学报, 2006, 26 (6): 403- 405.
- [5] 张宇, 李鸣, 汤志彪, 等. 基于 S7- 300PLC 的电加热器模糊控制编程实现 [J]. 南昌大学学报, 2005, 27 (3): 59- 63.
- [6] 周孚宏. 应用于 PLC 的一种新的模糊控制算法 [J]. 自动化仪表, 2005, 26 (10) 17- 20
- [7] 崔纳新, 张承慧, 张庆范. 模糊智能控制的异步电动机平稳软启动研究 [J]. 电气传动, 2004, (4) 29- 32