

文章编号: 1002-0411(2003)02-165-04

交流电机系统中的模糊控制研究

曲道奎¹ 史敬灼²

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所 沈阳 110016; 2. 哈尔滨工业大学 150001)

摘要: 本文对模糊控制的理论方法目前在交流电机系统中的应用作了全面的分析和总结. 针对交流电机系统控制的特点, 重点讨论了简单模糊控制、复合模糊控制以及仿生模糊控制等几种典型的模糊控制方法和技术, 分析了它们各自的特点和存在的问题, 并给出了模糊控制的实现方法和手段. 最后, 对模糊控制在交流电机系统中应用的关键问题和未来发展方向进行了展望.*

关键词: 交流传动; 电机系统; 模糊控制

中图分类号: T13P

文献标识码: B

RESEARCH ON FUZZY CONTROL APPLIED IN AC MOTOR SYSTEM

QU Dao-kui SHI Jing-zhuo

(1. *Shenyang Institute of Automation, Shenyang 110016; 2. Harbin Institute of Technology 150001*)

Abstract: This paper reviews the fuzzy control theories and methods used in AC motor system. Aiming at the control specialties of AC motor system, we discuss and analyze the merits and disadvantages of different fuzzy control methods such as simple fuzzy control, composite fuzzy control, as well as bionic fuzzy control etc. Some typical means to implement fuzzy control are given. Finally, we view the key research problems and development tendencies of fuzzy control in AC motor system in future.

Keywords: AC drive, motor system, fuzzy control

1 引言 (Introduction)

交流电机是一个多输入多输出的非线性系统, 它一方面具有较为确定的数学模型, 另一方面又具有非线性和参数变化的特点. 传统的电机调速系统大多采用结构简单、性能稳定的 PID 控制技术, 但这种方法局限于线性系统, 并过分地依赖于控制对象的模型参数, 鲁棒性差. 对于模型参数大范围变化且具有较强非线性环节的系统, PID 调节器难以满足高精度、快响应的控制要求, 常不能有效克服负载、模型参数的大范围变化及非线性因素的影响. 现在的控制方法, 包括矢量控制都是建立在系统数学模型的基础上, 一旦模型偏离了实际的系统, 控制系统的性能就会大大降低; 而且负载特性各不相同, 使得设计和调节都很困难. 为了获得交流电动机更好的控制方法, 国内外学者运用现代控制理论中几乎所有的方法进行了大量的研究. 将已有的经典控制方法和智能控制手段相结合, 是研究出高性能的交流调速系统的基本思路.

模糊控制是一种典型的智能控制方法, 广泛应用于自然科学和社会科学的许多领域, 其最大特点是将专家的经验 and 知识表示为语言规则用于控制, 它不依赖于被控对象的精确数学模型, 能够克服非线性因素影响, 对被调节对象的参数具有较强的鲁棒性. 模糊控制主要包括模糊化、模糊推理及模糊判断三部分. 其中模糊化将精确测量值转化为模糊语言, 用模糊集表示实测输入值; 模糊推理根据已知的控制规律和数据, 用已知的模糊输入量推导出相应的模糊输出, 它是模糊控制器的核心; 模糊判断实现由控制输出模糊量到精确量的转化, 以得出用于控制的精确输出值. 通常模糊判决所采用的方法有最大隶属度方法、中位数判决方法和加权平均法等.

将模糊控制器用于电机调速可以充分体现其适应非线性时变、滞后系统的控制及鲁棒性强的特点, 由于不需要建立被控对象的精确数学模型, 因而设计较方便. 近年来这方面的研究很活跃, 文中将就这方面的研究作一分析和总结.

* 收稿日期: 2002-10-10

2 简单模糊控制器在交流调速中的应用 (Application of simple fuzzy controller in AC timing)

2.1 速度控制

模糊控制在交流传动系统中的应用主要是速度控制^[1], 模糊控制器处于最外环, 而内环仍保留矢量控制等传统控制方法. 用模糊控制器取代常规的 PI 控制器^[2], 在参数变化、负载扰动的情況下仍可得到快速、强鲁棒性的控制效果. 为了使系统性能与机械负载匹配, 文献[3]应用模糊推理合成规则, 建立电动机模型, 采用参数自调整方案, 以满足过程响应在不同运动状态下对控制参数的不同要求.

模糊控制在转矩环的应用有感应电动机的转差增益调节控制. 当转差增益失调时, 用模糊逻辑来修改其中的参数以维持解耦条件成立. 文献[4]提出了一种采用模糊控制器的异步电机直接转矩控制系统, 应用模糊逻辑来确定逆变器的开关状态, 把磁链位置、磁链误差和转矩误差作为模糊变量, 模糊控制器基于一套模糊规则来选择开关状态, 从而有效地提高系统在启动和转矩指令突变时的响应速度.

2.2 模糊系统辨识

在异步电动机运行时由于定子电阻一直是变化着的, 这严重影响了系统的低速性能. 经典控制方法如直接转矩控制、解耦控制等很难解决这一问题. 文献[5]提出了基于模糊控制理论设计的定子在线观测器, 能比较准确地反映出定子变化的实时值, 为改善系统的低速性能创造了条件.

3 复合模糊控制技术(Composite fuzzy control technology)

将模糊控制策略直接用于电机的速度控制往往得不到好的控制效果. 控制器控制精度不高, 还会出现稳态误差. 增加论域的数量固然可以提高控制精度, 但会降低控制器的处理速度, 增加数据的储存量, 论域过小时还可能使系统不稳定. 采用复合模糊控制是解决这一矛盾的有效方法.

3.1 参数自调整模糊控制

比例因子自适应调整法是根据 e 和 ec 的大小变化, 不断改变 e 、 ec 的量化因子 GE 、 GE_C 和控制量 u 的比例因子 GU . 文献[6]提出了一种基于自调整模糊控制器的笼型异步电动机位置控制器的设计方法, 其模糊控制器包括普通模糊控制器和量化因子自调整两个部分, 经过仿真和实验证明了这种方法

具有优良的控制特性和很强的鲁棒性, 满足位置控制的要求.

3.2 模糊 PID 控制

将模糊控制与其他控制手段结合起来的复合模糊控制比传统控制有更快的动态特性和更小的超调量, 比单纯的模糊控制有更高的稳态精度.

模糊 PID 控制器^[7,8]用模糊控制的方法在线调节 PID 参数. 此外 Fuzzy-PI 复合控制^[9,10]是将 PI 控制策略引入模糊控制器, 在大偏差范围内采用模糊控制, 在小偏差范围内转换为 PI 控制. 这种复合控制比 PI 控制有更快的动态响应特性和更小超调, 比模糊控制具有更高的稳态精度. 将 Fuzzy-PI 复合控制用于交流伺服系统可以使系统对负荷参数变化的适应性加强, 且上升无超调, 响应速度快. 在实际运用中, 文献[11]针对原系统波动大、维护困难等缺点, 开发出了一种基于混合型模糊 PID 控制器的、利用高可靠性的单片机实现的变频调速系统, 实现了速度恒值控制, 系统精度高, 可靠性好.

3.3 变结构模糊控制

变结构控制理论具有一系列优点, 如对系统的摄动和干扰具有完全的自适应性, 它不仅适用于线性系统, 也适用于非线性系统、不确定系统. 近年来人们在将变结构用于电机调速方面作了大量研究, 发现由于滑动模态上的抖动会造成系统稳态精度不理想, 特别是在加载情况下系统存在明显静差. 因而, 削弱滑动模态抖动是变结构控制实际应用必需解决的问题.

模糊变结构控制有两种办法, 其一是当 e 和 ec 较大时, 系统开环运行, 控制器输出极限值, 电动机以最大的容许输出功率使系统加速或减速; 反之, 模糊控制器投入工作, 系统闭环运行. 这时量化 e 和 ec 的取值均较小, 系统对其有较高的分辨率. 其二是在 e 和 ec 较大时采用模糊控制, 而反之采用常规的 PI 控制算法, 以便使系统稳态无误, 并且由于积分环节只是在很小的偏差范围内作用, 系统也不会出现较大的超调. 文献[12]将模糊滑模控制应用于感应电动机控制系统, 可有效地抑制抖振, 由于模糊控制作为有差系统, 难以满足高精度调速的性能要求, 又引入了误差积分以消除静态误差, 提高控制精度. 文献[13]根据滑模面切换函数及其变化率, 采用模糊控制的方法输出控制量, 同时对负载转矩进行观测, 从而有效地削弱了抖动, 解决了系统静差问题, 提高了系统的快速性和鲁棒性.

3.4 模糊锁相环控制

针对感应电机锁相环(PLL)控制存在的缺点, 如在大的转矩阶跃输入和负载扰动下 PLL 运行不可靠及在高转速下响应速度缓慢等, 文献[14]提出了把模糊控制与锁相环控制相结合应用于感应电机的调速系统中. 这种设计使得在大范围误差内系统只有模糊控制的作用, 避免了鉴相器的非线性区域及锁定与捕捉范围的限制, 而且使系统在模糊控制的作用下快速地进入锁相环的快捕范围内. 而当系统的误差小于一定值时, PLL 参与作用, 系统进入相位捕获阶段, 进而达到相位锁定, 输出转速能精确地跟踪输入转速, 并使锁相环路的设计只需要满足稳态性能的要求.

3.5 自适应模糊控制

在模糊控制系统中, 量化因子和比例因子的选取对系统性能影响很大. 一旦这些因子确定后, 当给定对象参数时或参数扰动变化过大时, 控制效果则会变差, 因此人们提出了许多改进方案^[15]. 文献[16]将自组织模糊控制器用于电机调速系统的研究, 提出了直接修改模糊控制器算法. 文献[17]讨论了参数自适应模糊调节器在变频调速中的应用, 在一定程度上解决了常规模糊控制器参数在控制过程中不变而满足不了变频调速系统响应速度快且稳态精度要求高的问题. 因为模糊控制一般为 PD 控制, 当控制精度要求高的时候则很难满足要求. 有人设计了一种自适应模糊控制器, 根据控制的误差值, 通过适当的调节规则来调整一些关键控制参数值, 使系统能自动适应被控对象参数及结构的变化. 它用于高精度直流调速系统中, 使系统具有响应快、超调小、对系统参数及结构变化适应性强的优点.

4 仿生模糊控制(Bionic fuzzy control)

在交流调速中, 应用模糊规则的获取和模糊控制器参数的设定是模糊控制器设计的两个重要步骤. 然而它们都没有系统的方法, 主要依靠控制专家的经验与设计者的反复经验. 为了提高模糊控制器的动静态性能, 人们进行了大量的研究. 近年, 神经网络和进化计算理论的研究给模糊控制的研究提供了新的工具, 将神经网络和遗传算法用于模糊控制的规则辨识、控制参数调整及规则优化等方面是一种新的思路.

4.1 神经网络模糊控制

将神经网络技术应用于模糊技术中, 构成模糊神经网络系统是当前颇受人们关注的新颖控制策略

之一. 基于模糊神经网络技术, 利用神经网络的自学习功能, 提出了一种感应电机定子电阻在线估测的有效方法. 在对广泛选择的样本进行学习后, 优化了控制规则、各语言变量的隶属函数及每条规则的输出函数, 在线估测结果与实验结果吻合良好, 为进一步估算直接转矩控制或矢量控制系统中电机的磁通提供了可靠的保证.

根据模糊逻辑神经网络和滑模控制特点, 推出感应电动机模糊控制算法, 利用神经网络实现在线自调整控制部分参数, 研究了一个由电压型变频器供电的自调整模糊神经网络滑模控制系统, 充分发挥了几种控制手段的优势. 由于模糊控制稳态精度低, 因此采用串联或并联积分环节或在小误差范围内切换到 PID 控制的方法来解决时, 存在积分环节的引入会使动态响应慢、小范围内工作的 PID 会使系统鲁棒性降低等问题. 针对这些情况, 提出模糊单神经元混合控制, 用单神经元取代 PID 调节器, 充分利用单神经元的自学习、自组织能力对控制器的权重进行在线调整, 即保证了系统的稳态精度和快速性, 又具有良好的鲁棒性.

4.2 遗传算法模糊控制

遗传算法模糊控制是另一种仿生模糊控制方法, 遗传算法(GA)是基于自然选择和遗传的全局自适应搜索技术. GA 可用于确定模糊控制器的参数, 自动获取控制规则. 在伺服异步电动机控制系统中, GA 用于设计磁通观测器, 它能适应电机模型参数扰动较大的情况和不同的运行条件. 水轮发电机调速器采用 GA 进行自适应调节, 可以有效地跟踪电厂参数变化, 产生优化控制参数. 有人采用遗传算法考察了不同模糊算子和模糊决策方法对动静态性能的影响. 提出采用 GA 学习模糊直接转矩控制系统中的转矩误差隶属度函数分布, 通过几次迭代学习, GA 就找到一组满意的模糊隶属度函数分布. 仿真表明, 通过 GA 的优化, 系统具有转矩响应速度更快、谐波电流小等优点. 将遗传算法同模糊神经网络技术相结合用于交流调速系统, 也会取得很好的控制效果.

5 模糊控制的实现手段(Implementation means of fuzzy control)

应用计算机实现模糊控制的方法可概括为软件实现和硬件实现两大类. 查询表方式的模糊控制器的设计是以软件来实现模糊控制系统的一种方法. 目前, 许多国内外学者正进行着软计算集成的研究,

其中主要是研究模糊逻辑与其它软计算的集成,如神经网络、遗传算法、学习理论的集成等。

现在常见的模糊控制软件有美国的 FIDE 模糊控制推理开发软件、德国模糊逻辑系统的软件工具 fuzzy TECH、美国 NS 公司的神经模糊控制软件等。随着模糊控制开发工具和模糊芯片、模糊微控制器产品的大量问世,可借助开发工具进行模糊控制系统软件设计,也可用模糊控制芯片通过硬件方法实现模糊控制。

近年,研制和开发了许多用于模糊推理的模糊芯片,如模糊微处理器、模糊推理板及模糊单片机等,直接通过硬件实现模糊逻辑和模糊推理,可极大地提高推理速度和控制精度,为模糊控制系统的硬件实现提供了强有力的工具。

1992年,德国 Siemens 公司和 Inform 公司联合研制了 Fuzzy-166 芯片,号称第三代模糊微处理器。1993年,美国 NS 公司推出了 NeuFuz4 型神经网络模糊逻辑编译器,使 COP8 单片机模糊控制具有了自学习功能。目前世界上研究和生产模糊微处理器的大公司有美国的 Motorola 和 NS 公司,日本的 Omron、Fujitsu、Oki、Toshiba 公司,德国的 Inform、Siemens 公司等。随着模糊芯片和神经网络芯片的日益成熟,其价格将会越来越低,可望在高性能调速系统中获得广泛的应用。

6 存在的问题及发展展望(Existing problems and development outlook)

模糊控制提供了常规控制策略不能代替的高效控制方法,因而在各个领域得到了广泛的应用。尽管将模糊控制用于电机调速取得了一些成果,但也存在着一些有待进一步研究的问题。

- (1) 基于模糊控制的调速系统的稳定性分析,稳定性的评价方法和可控性的评价方法。
- (2) 调速系统模糊控制规则的系统化设计方法。
- (3) 模糊逻辑与经典调速理论集成的有关理论。
- (4) 模糊控制的优化问题。

人们还在不断地尝试把新的模糊控制手段运用于这个领域。已经开始应用的技术也还有待于在实践中得到进一步的完善。相信不久的将来,随着模糊

控制技术的不断发展及其在电机调速系统中应用的日益成熟,交流调速的性能会有大幅度的提高,模糊控制技术也会因此而更加成熟和实用。

参 考 文 献 (References)

- 1 Ortega R, Nicklasson P J. Speed control of induction motors [J]. Automatica, 1996, 32(3): 455~460
- 2 Caudas C, Selene S. Lyapunov-based torque control design for induction motors[A]. Oerugia, IT: Proc. IFAC Workshop Motion Control[C]. 1995. 554~559
- 3 梁慧冰. 基于模糊模型辨识的参数自调整模糊控制器在交流调速中的应用[J]. 电气传动, 1994, (4): 2~7
- 4 詹波, 吴浩烈. 采用模糊控制的感应电机直接转矩控制[J]. 贵州工业大学学报, 1998, 8(4): 71~75
- 5 胡刚, 许越, 胡育文. 直接力矩控制系统的模糊在线观测器的设计[J]. 电气传动, 1997, (1): 21~25
- 6 程善美, 邓忠华. 基于模糊控制器的异步电动机位置控制[J]. 微电机, 1996, (2): 20~23
- 7 舒怀林, 魏泽国. 交流串级调速双环模糊 PI 单片机控制系统[J]. 电气传动, 1993, (6): 16~20
- 8 Zhan Zhenyu, Masayoshi Tomizuka. Fuzzy gain scheduling of PID controllers [J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 1993, 23(5): 571~574
- 9 Kuk D P, Tamet P, et al. Linguistic PID controllers [A]. Preprints of 11th IFAC World Congress [C], 1990
- 10 程善美. 交流伺服系统中基于模糊控制的速度控制器[J]. 电气传动, 1995, (4): 26~29
- 11 张焰, 江奔坚. 基于模糊控制的分切机变频调速系统[J]. 电气传动, 1997, (6): 12~15
- 12 邱焕耀, 毛宗源. 模糊滑模控制的感应电动机解耦变结构控制系统[J]. 电气自动化, 2000, (1): 42~44
- 13 王元成, 徐展. 基于转矩观测器的模糊滑模控制交流伺服驱动系统[J]. 电气传动, 1998, (1): 17~20
- 14 钱来. 基于滑动模解耦的感应电动机字校正、锁相环及模糊控制[D]. 华南理工大学, 1998
- 15 薛峰, 谢运祥, 吴捷. 直接转矩控制系统的转速估算模型及其参数补偿方法[J]. 电工技术学报, 1998, 13(5): 26~30
- 16 邵世煌. 自组织模糊控制器[J]. 自动化学报, 1987, 13(2): 149~150
- 17 何峰. 参数自适应 Fuzzy 调节器在变频调速中的应用[J]. 电气传动, 1990, (6): 43~48

作者简介

曲道奎(1961-), 男, 研究员. 研究领域为机器人学, 智能控制。

史敬灼(1974-), 男, 博士后. 研究领域为电力电子, 电机控制。