

复合二维模糊控制器及其模糊推理方法的研究

许镇琳, 郭鑫华, 王秀芝, 刘 旻

(天津大学 电气自动化与能源工程学院, 天津 300072)

摘要: 实现三维模糊控制效果, 而控制规则数与二维模糊控制器相当. 模糊控制规则解析生成. 模糊推理方法基于相平面, 计算量小, 直接用输入连续量进行推理. 该控制器结构及算法简单, 易于在线实现, 具有通用性. 将其用于交流调速系统, 实验结果表明控制性能较 PI 算法更佳.

关键词: 模糊控制; 在线解析; 相平面推理; 交流调速

中图分类号: TM39.2 **文献标识码:** A

Research on hybrid fuzzy controller and its inference approach

XU Zhen-lin, GUO Xin-hua, WANG Xiu-zhi, LIU Min

(School of Electrical Automation and Energy Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: A three-term fuzzy controller was implemented by simply using two-term fuzzy control rules. The fuzzy control rules were generated analytically. The method of fuzzy inference based on phase plane had less computational burden, while the fuzzy inputs could be continuous, which improved the precision. This controller had simpler structure and control algorithms and could be realized on line analytically. The experiment shows that when it is used in AC speed control system, its performance is better than that of PI controller, and the system is much more robust.

Key words: fuzzy control; online analyzing; phase plane inference; AC speed control

1 引言 (Introduction)

模糊控制作为实现智能控制的一种途径, 目前已广泛应用于各种控制领域.

二维模糊控制器相当于变系数的 PI 或 PD 控制器, 二者各有不足. 三维模糊控制器控制效果相当于非线性 PID 控制器, 可提高性能^[1], 但会使设计复杂, 并造成控制规则数量大^[2]. 模糊控制器的性能很大程度上取决于模糊控制规则的确定, 常见的获取模糊规则的方法^[3]有: 基于专家的知识 and 经验, 这可能导致规则不完整甚至相互矛盾; 自组织模糊控制器一般要利用神经网络, 需要大量训练时间; 利用模糊辨识则与模糊控制器不需要被控对象数学模型的优点相违背. 通常, 模糊控制器的实现方法为查表法, 通用性不强, 对输入离散量进行处理, 精度不高.

针对上述问题, 本文提出一种复合二维模糊控制器, 将二维模糊 PI 控制和模糊 PD 控制组合, 在控制规则数保持为二维控制器水平的同时达到三维模糊控制的非线性 PID 控制效果. 控制规则解析生成. 模糊推理方法基于相平面, 控制精度高且过程简易, 计算量小. 该模糊控制器结构和算法简单, 易于在线

解析实现, 将其用于交流调速系统, 实验结果表明, 控制效果较 PI 控制好.

2 模糊控制器的设计 (Fuzzy controller design)

2.1 模糊控制器的结构 (Structure of fuzzy controller)

本文中提出的模糊 PI + PD 控制器, 既克服了模糊 PI 控制在高阶系统中过渡过程性能较差的不足, 又解决了模糊 PD 控制难以消除稳态误差的问题, 其结构如图 1.

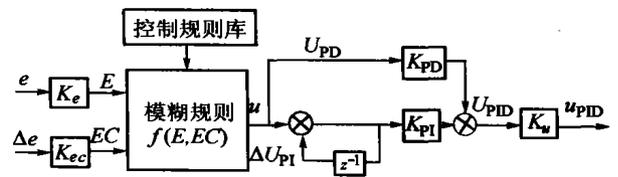


图 1 模糊 PI + PD 控制器结构

Fig. 1 Structure of fuzzy PI + PD controller

输入变量为误差 e 和误差变化 Δe , 相应的模糊变量为 E 和 EC , 其语言值数为 N_1, N_2 , 量化因子为 K_e, K_{ec} . $U_{PD} = \Delta U_{PI} = u$, u 为模糊推理的输出. K_w 为输出比例系数, K_{PD} 和 K_{PI} 分别为模糊 PD 和模糊

PI 控制的权系数. u_{PID} 为复合二维模糊控制器的输出变量, 其模糊变量为 U_{PID} .

一般这两部分用相同的推理方法, 但采用不同的控制规则. PI 控制器的增量式表达式为

$$\Delta u_{PI}(k) = K_i e(k) + K_p \Delta e(k),$$

而 PD 控制器的全量式表达式为

$$u_{PD}(k) = K'_p e(k) + K_d \Delta e(k).$$

两者都是 $e(k)$ 和 $\Delta e(k)$ 的线性组合, 只是系数不同. 考虑到增量式 PI 算法和全量式 PD 算法的这种相似性, 为进一步简化设计过程, 减少控制规则数量, 本文的模糊 PI 和 PD 控制共享同一控制规则库, 将控制规则数减少到 $N_1 \times N_2$.

2.2 模糊控制规则的解析生成 (Generate fuzzy control rule analytically)

在文[4]的基础上, 本文提出借助 PI 控制算法确定模糊控制规则的解析方法. 该方法产生非线性规则, 易于在线生成和修改控制规则库.

数字 PI 控制的增量式算法为

$$\Delta u_{PI}(k) = K_P \Delta e(k) + K_I e(k), \quad (1)$$

$$u_{PI}(k) = u_{PI}(k-1) + \Delta u_{PI}(k), \quad (2)$$

式中, K_P 为比例增益, K_I 为积分系数. 如果 $e(k)$, $\Delta e(k)$ 是模糊变量, 则式(1), (2)表示增量式模糊 PI 算法. 本文根据模糊 PI 算法计算模糊控制规则, 该规则库同样用于模糊 PD 控制.

若定义参数

$$K_I = S * \alpha, \quad K_P = S * (1 - \alpha), \quad \alpha \in [0, 1],$$

式中, S 为比例系数, α 为平衡 E 与 EC 的加权因子.

由式(1)可得

$$\Delta u_{PI}(k) = S[\alpha e + (1 - \alpha)\Delta e]. \quad (3)$$

为方便规则生成, 将模糊控制器的输入变量 E 和 EC 的论域离散化为 $\{-N, \dots, -1, 0, 1, \dots, N\}$, 模糊推理的输出变量 $\Delta U_{PI}(U_{PD})$ 的论域离散化为 $\{-M, \dots, -1, 0, 1, \dots, M\}$, 其中 N, M 分别是不同模糊变量的语言值数. 各模糊变量的隶属函数取三角形对称分布型.

将式(2), (3)进行模糊化, 可得增量式模糊 PI 算法. 由于输入 E, EC 和模糊推理输出 U 之间存在不同的量化等级, 引入调整因子 β , 定义 $\beta = M/N$, 并将比例系数 S 提出来, 归并到量化因子 K_e 和 K_{ec} 中, 则

$$\Delta U_{PI}(k) = \beta[\alpha E + (1 - \alpha)EC]. \quad (4)$$

通过式(4)即可自动获得控制规则, 其中加权因子 α 在调试过程中根据实际情况确定.

2.3 基于相平面的模糊推理及去模糊化 (Fuzzy inference based phase plane and defuzzification)

模糊推理由条件聚合、推理和累加三部分组成, 通常对每条控制规则求取条件满足度及模糊控制量输出. 而常用的去模糊化的方法是面积重心法 (COG), 即

$$u = \frac{\sum_{i=1}^n u_i \mu(u_i)}{\sum_{i=1}^n \mu(u_i)}, \quad (5)$$

式中, n 为控制规则总数, u_i 为第 i 条规则的模糊控制量输出, $\mu(u_i)$ 为第 i 条规则的条件满足程度.

当控制规则库较大时, 用上述方法在线解析计算控制输出量需要耗费大量时间. 而查表法对输入量进行离散处理, 精度不高, 且不具备通用性.

本文提出一种基于相平面的模糊推理方法. 该方法在输入变量的连续论域内进行模糊推理, 提高了精度, 且每次推理最多只选用 4 条控制规则, 不涉及模糊输入变量的隶属函数, 减小了计算量. 采用软件在线解析实现, 在模糊控制规则库较大的情况下效率提高尤其明显. 该方法具有通用性.

表示条件和控制输出量之间关系的相平面如图 2 所示. 在相平面中, 横轴表示误差 E , 纵轴表示误差变化 EC , 每个节点对应控制规则库中一条确定的控制规则, 用 r_{ij} 表示, 相平面上任一点表示一对经模糊化的输入, 即 $P_i(E, EC)$. P_i 点的临近区域 A_i 定义为以 P_i 为圆心, 以模糊输入的量化间隔 a 为半径的圆. 通常, $a = 1$.

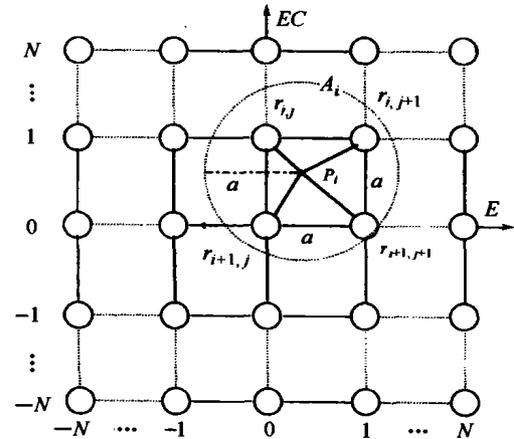


图 2 模糊相平面 ($E-EC$ 平面)

Fig. 2 Fuzzy phase plane ($E-EC$ plane)

如果 P_i 恰好位于某一节点, 则相应的控制量为该节点对应规则的输出控制量. 如果 P_i 位于非节点处的任何位置, 则相应的控制量由该点临近区域 A_i 包含的节点对应的规则决定.

这样, 去模糊化方法的基本算法仍基于式(5),

不同的是每次模糊推理所用的控制规则不是所有规则,而是区域 A_i 包含的节点所代表的规则 $r_{i,j}$, $r_{i+1,j}, r_{i,j+1}, r_{i+1,j+1}$, 最大控制规则数减少到4,简化了条件聚合。

类似于式(5),本文提出的控制量输出的算法为

$$u = \sum_{j=1}^l u_{ij} \delta_j(p_i) / \sum_{j=1}^l \delta_j(p_i), \quad (6)$$

式中, l 为对点 p_i 的模糊推理所用的控制规则数, $l = 1, 2, 3, 4$. u_{ij} 为控制规则 r_{ij} 对应的控制量输出, δ_j 为输入点 $P_i(E, EC)$ 对第 j 条规则的满足度。

δ_j 由下式决定:

$$\delta_j = 1 - d_j, \quad d_j(p_i, r_{ij}) = \begin{cases} \|r_{ij} - p_i\|, & \|r_{ij} - p_i\| \leq 1, \\ 1, & \text{其它.} \end{cases}$$

其中: d_j 表示点 $P_i(E, EC)$ 与节点 r_{ij} 之间的欧几里德距离. 通过式(6)和(7),对输入连续量进行在线模糊推理,控制精度及推理效率大大提高。

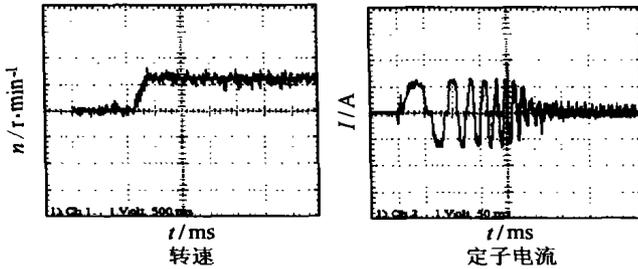


图3 采样PI调节器的响应曲线
Fig. 3 Reposed curve under PI controller

4 结论(Conclusions)

本文提出的基于相平面推理方法的在线解析模糊控制器,其特点如下: 1) 将二维的模糊PI控制和模糊PD控制组合,在控制规则数保持为二维控制器水平的同时达到三维模糊控制的非线性PID控制效果,克服二维模糊控制器的缺陷,且不增加设计难度; 2) 从PID算法出发,模糊控制规则解析生成; 3) 基于相平面的模糊推理方法简易,计算量小,且对连续输入量进行处理,控制精度高,易于软件在线解析实现; 4) 具有较强的通用性。

实验结果表明,该控制器使系统动态响应快、无超调,且其结构及算法简单,易于实现,适合于实时控制。

参考文献(References):

[1] 刘向杰,柴天佑,张焕水. 三维模糊控制器的结构研究[J]. 自动化学报, 1998, 24(2): 230 - 235.
(LIU Xiangjie, CHAI Tianyou, ZHANG Huanshui. Structure analy-

模糊调节器的输出为:

$$u_{PID}(K) = K_u(K_{PD}U_{PD}(K) + K_{PI}(U_{PI}(K-1) + \Delta U_{PI}(K))). \quad (8)$$

3 实验结果(Experiment result)

为了测试调节器性能,以永磁同步电动机为控制对象,将该模糊控制器用作全数字交流调速系统的速度环调节器. 该系统的控制核心为TI公司TMS320F240型DSP,模糊控制器规则的生成、模糊推理和去模糊化都由DSP在线解析进行,实现简单容易,达到了实时控制要求。

图3,4为空载启动时电机的转速和定子电流波形,速度给定为1000 r/min,图3为采用PI作为速度调节器的响应曲线,调整时间约为260 ms;图4为采用模糊调节器的响应曲线,调整时间约为160 ms. 实验结果表明,模糊控制器的性能较PI控制有所改善。

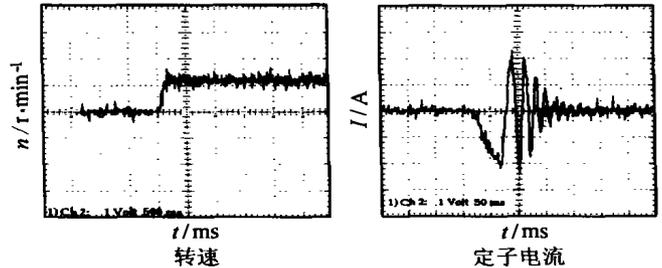


图4 采样模糊调节器的响应曲线
Fig. 4 Reposed curve under fuzzy controller

sis of three-dimension fuzzy controller [J]. *Acta Automatica Sinica*, 1998, 24(2): 230 - 235.)

[2] LI H X, GATLAND H B. Conventional fuzzy control and its enhancement [J]. *IEEE Trans Systems, Man, Cybernetics B*, 1996, 26(5): 791 - 797.
[3] SUGENO M. An introductory survey of fuzzy control [J]. *Information Sciences*, 1985, 36(1): 59 - 83.
[4] ZHANG Zhiming, MASAHARU Mizumoto. On rule self-generating for fuzzy control [J]. *Int J Intelligent Systems*, 1994, 9(12): 1047 - 1057.

作者简介:

许镇琳 (1939 —), 男, 天津大学自动化学院教授、博士生导师, 主要研究方向是自动化, 现代电力传动及计算机控制. E-mail: zlxu@eyou.com;

郭鑫华 (1975 —), 女, 天津大学控制理论与控制工程专业硕士, 现在深圳华为技术有限公司从事研究开发工作;

王秀芝 (1940 —), 女, 天津大学自动化学院教授, 研究方向为计算机过程控制, 计算机控制技术及其应用;

刘 翌(1978 —), 男, 天津大学自动化学院2002年硕士毕业, 研究方向为计算机智能控制及其应用。