

[自控·检测]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2015.05.016

基于模糊 PI 控制的 PMSM 驱动控制系统

姜伟, 孙军, 裘信国

(浙江工业大学机械工程学院, 浙江杭州 310014)

摘要:针对 PI 参数自整定存在控制系统数学模型的精确度、整定效率低和优化时间长的问题,提出一种基于模糊控制的参数自整定的优化策略。以伺服控制系统的数学模型为基础,根据模糊控制的基本原理,设计 PMSM 的速度模糊 PI 控制器。然后根据矢量控制原理,在 MATLAB/Simulink 仿真平台上搭建 PMSM 控制系统的模型,并对 PMSM 控制系统进行了仿真。仿真结果表明:在传统 PI 控制的基础上增加参数自整定是正确和有效的,能使伺服系统具有较强的负载抗扰性和良好的动态跟踪性能。

关键词:永磁同步电机(PMSM);参数自整定;PI 控制器;模糊控制

中图分类号:TP13

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2015)05-0069-04

PMSM Drive Control System Based on Fuzzy PI Control

JANG Wei, SUN Jun, QIU Xinguo

(College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: For the PI parameter self-tuning control system with the problems of the accuracy of the mathematical model, the low tuning efficiency and optimization for a long time, a self-tuning parameters optimization strategy based on fuzzy control was presented. Firstly, basing on the mathematical model of the servo control system based on and the basic principle of fuzzy control, the PMSM speed fuzzy PI controller was designed. Then, according to the vector control theory, a model of PMSM control system was built in MATLAB/Simulink simulation platform, and the PMSM control system was simulated. The simulation results show that the increase parameters on self-tuning in the traditional PI control is correct and effective, and the servo system has strong load immunity and good dynamic tracking performance.

Key words: permanent magnet synchronous motor(PMSM); self-tuning parameters; PI controller; fuzzy control

传统伺服控制系统中,系统参数的变化与控制系统的控制性能好坏有直接关系,例如转动惯量参数和负载转矩参数发生变化的时候会导致系统震荡。保持系统参数的稳定,就能保证控制系统工作正常,并且其有良好动态性能。

传统的 PI 控制参数是固定的,因此需要对 PI 参数进行自整定。参数整定的方式主要可分为 2 大类:利用规则调节 PI 参数和利用模型调节 PI 参数。利用模型调节 PI 参数的方法十分复杂,伺服系统的一些参数会不断变化,数学模型很难精确地表达。而且为了建立模型还要做出诸多假设,模型很难做到非常精确^[1]。

本文采用模糊参数自整定的方法对 PI 参数进行整定。在传统 PI 控制的基础上,在系统参数发生变化时,利用模糊规则调节 PI 控制器的参数,从而使控制系统始终保持良好的动静态性能。

1 速度环模糊 PI 控制器的设计

1.1 PI 控制器

在控制系统中,电流环的时间常数远远小于速度环的时间常数,相对于速度环来说电流环的变化可以忽略不计,因此可以将速度环等效成一阶增益环节。速度环结构控制框图见图 1。

其中,速度控制器采用 PI 控制,其传递函数为

$$G_{ASR} = K_{ps} \left(1 + \frac{K_{is}}{s} \right) \quad (1)$$

收稿日期:2015-03-18;修回日期:2015-06-08

作者简介:姜伟(1962),男,浙江江山人,教授,博士,主要研究方向为机电装备与控制、噪声与振动控制。E-mail:654875107@qq.com

式中: K_{ps} 为速度控制器的比例系数; K_{is} 为速度控制器积分常数; s 是变量。

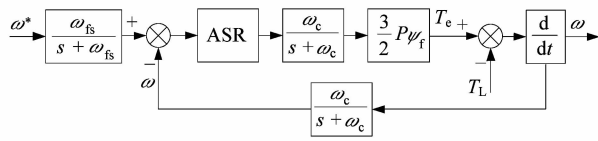


图 1 速度环结构控制框图

Figure 1 Control diagram of speed loop structure

速度环开环传递函数为

$$G_{so}(s) = K_{ps} \left(1 + \frac{K_{is}}{s} \right) \cdot \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \cdot \frac{3P\psi_f}{2J_s} \cdot \frac{\omega_{fs}}{s + \omega_{fs}} \quad (2)$$

式中: ω_c 表示电流控制器带宽; ω_{fs} 表示滤波器的截止频率; P 表示电机的极对数; ψ_f 表示电机转子永磁体磁链; J_s 表示电机转子转动惯量^[2]。

PI 控制器自从产生到现在, 凭借优良的控制性能和简单的结构广泛地应用于工业生产中, 目前仍然是应用范围最广的控制算法。比例控制器主要作用是保证系统具有较快的响应速度, 积分控制器的主要作用是提升调速系统的静态性能^[3]。常用的 PI 控制器的参数是固定的, 控制器只能在小范围内保证较高的控制性能^[4]。一旦系统参数变化或者有外部干扰的时候, 控制系统的动态性能就会下降。

1.2 基于模糊控制 PI 控制器参数自整定

模糊控制的优势在于可以简单模拟人的思维机制, 模糊控制通过模糊集合设定与模糊控制规则的设置来实现控制目标^[5]。传统 PI 控制器的参数比例系数 K_p , 积分常数 K_i 只能人为的改变, 通过结合模糊控制, 把速度的偏差 e 和偏差变化率 e_c 作为模糊控制的输入, 比例系数调节量 ΔK_p , 积分常数调节量 ΔK_i 作为模糊控制的输出, 就可以实现 PI 参数的实时自整定。这样就克服了传统 PI 控制的缺点, 不仅保证了控制系统的快速响应和动态跟踪的性能, 还扩大了控制系统的控制范围, 提高控制系统的动态性能和抗干扰能力, 使得控制系统有一定的适应能力。模糊 PI 控制器结构框图见图 2。

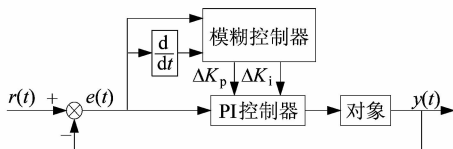


图 2 模糊 PI 控制器结构框图

Figure 2 Structure diagram of fuzzy PI controller

模糊 PI 控制器的实现方式如下: 在整个系统运行

的过程中不断检测实时速度, 通过给定值计算出偏差值 e ; 偏差值 e 分别输入给 PI 控制器和模糊控制器, 模糊控制器通过微分计算出速度偏差的变化率 e_c ; e 和 e_c 作为模糊控制器的输入变量经过模糊推理、解模糊后得到修正参数 $\Delta K_p, \Delta K_i$, 及其和 PI 控制器的控制参数比例系数 K_p , 积分常数 K_i 相加得到修正后的参数 $K'_p = K_p + \Delta K_p, K'_i = K_i + \Delta K_i$; 修正之后的参数再作用于控制系统, 以实现理想的控制效果^[6]。

2 模糊控制器的设计

2.1 模糊化与隶属度函数的选取

为了对输入量进行模糊推理, 首先要通过量化因子将其转化为论域范围内, 然后再对输入量进行模糊化。通过选取合适的模糊控制器量化因子, 可以将偏差量 e 和偏差变化率 e_c 及比例系数调节量 ΔK_p 和积分常数调节量 ΔK_i 量化到 $[-6, 6]$ 区域内。本文选取误差量化因子 0.003, 误差变化率因子为 0.000 01。

隶属度函数的控制效果与模糊子集设定存在映射关系, 模糊子集的域值和隶属度函数的选取有着直接关系, 正态分布函数和正弦函数相对于三角函数和梯形函数来说数控制精度高, 但是计算复杂, 控制器运算量比较大, 因此通常选取三角函数作为隶属度函数^[7]。输入变量 e 和 e_c 和比例系数调节量 ΔK_p , 积分常数调节量 ΔK_i 的论域为 $[-6, 6]$, 隶属度函数如图 3 所示。

2.3 模糊规则的制定

模糊规则的设置是设计模糊控制器的重点, 合理的控制规则能得到控制系统良好的动态静态性能^[8-9]。模糊控制规则结合专家语言知识来模拟人的思维模式, 实现模糊控制的推理决策^[10]。

本文中输入和输出变量的语言变量有 7 个, 为 {负大, 负中, 负小, 零, 正小, 正中, 正大}, 对应于 {NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}。通常情况下模糊子集个数越多, 其控制精度会越高, 但会增大计算量, 因此本设计中选择 7 个模糊子集。

对于不同的输入, 模糊控制器的输出要满足以下要求:

1) 当偏差绝对值较大时, 增大 K_p 加快响应速度, 减小 K_i 防止超调过大。

2) 当偏差和偏差变化率绝对值取值中等时, 分为 2 种情况: 偏差和偏差变化率异号时, 控制量朝着给定值方向变化, 逐步减小 K_p, K_i 的值; 偏差和偏差变化率同号时, 控制量偏离给定值方向变化, K_p 取的值大一些, K_i 取适当的值。

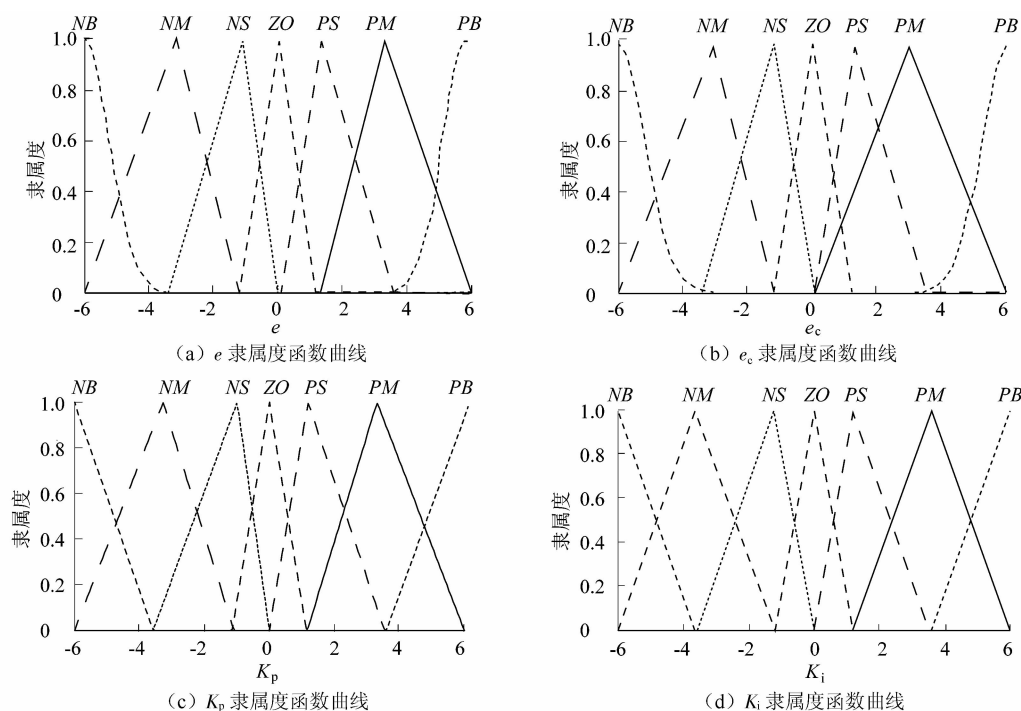


图3 输入/输出变量隶属度函数曲线

Figure 3 Function curve of input/output variables membership

3) 当偏差绝对值较小时,为使控制系统具有良好稳态性能,应适当弱化 K_p 值,增强 K_i 值,防止系统震荡。

Fuzzy 控制器中隶属函数的输入变量 e 和 e_c 与输出变量 K_p 的控制规则如图4所示。

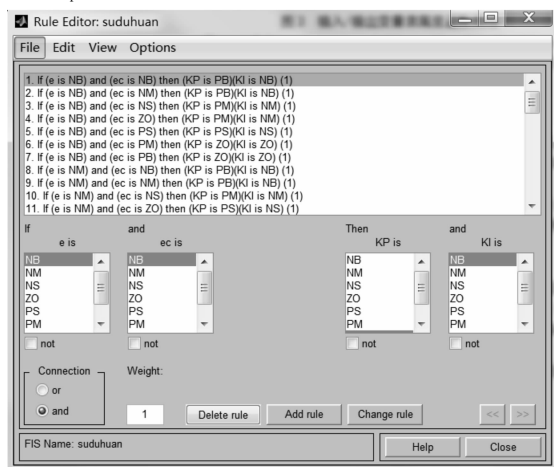


图4 模糊控制规则

Figure 4 Fuzzy control rules

图4中2个输入变量 e 和 e_c 的语言变量各有7个,选择 and 的组合方式一共有49条模糊控制规则,为了直观的展现输入变量 e 和 e_c 与输出变量 K_p 之间的关系,可以观察其模糊控制规则的曲面图,如图5所示。

2.3 解模糊

模糊输出并不能直接作用于控制系统,还需进一

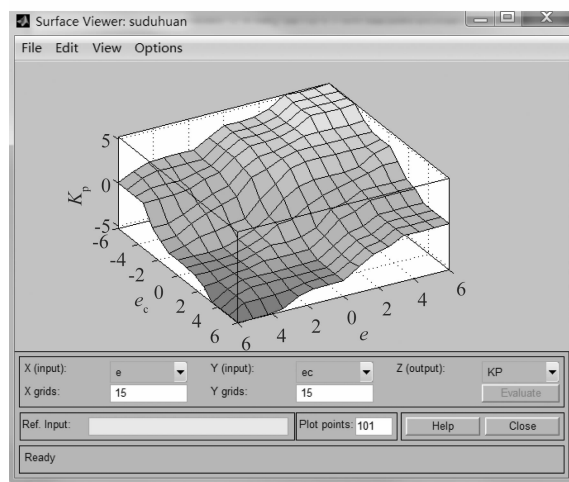


图5 模糊规则曲面图

Figure 5 Diagram of fuzzy rule surface

步对模糊输出做解模糊处理。模糊处理的方法也有很多种,本文采用应用比较广泛的重心法。重心法应用性比较好且利于实现,具体的计算公式^[11]为

$$x_0 = \frac{\int x_i \times u(i)}{\int u(i)} \quad (3)$$

式中: x_0 为输出变量的精确值; x_i 为输出变量的模糊值; $u(i)$ 为各组元素的权重; i 为元素变量。

