

基于蚁群算法的永磁同步电机模糊PI控制策略研究

郑子健

上海理工大学机械工程学院, 上海

收稿日期: 2024年10月26日; 录用日期: 2024年11月19日; 发布日期: 2024年11月26日

摘要

在三相永磁同步电机的矢量控制中, 传统PI控制由于其参数的固定, 在变化的动态系统中表现不佳, 易出现超调、失真等影响, 使用模糊PI控制可以有效改善传统PI控制中例如无法较好地适应不同转矩的缺陷。但模糊PI控制中的量化因子与比例因子的选择过于依赖经验, 由此本文提出一种基于蚁群算法优化的模糊PI控制器, 使用MATLAB/Simulink软件进行仿真, 分析了优化后的转速、电磁转矩与三相电流在不同控制方式下的图像, 最终得到了蚁群算法优化下的模糊PI控制器与传统PI控制器相比具有良好的仿真效果, 满足了三相永磁同步电机精度需求高、响应需求快以及输出需要稳定的要求。

关键词

三相永磁同步电机, PI控制, 模糊控制, 蚁群算法, MATLAB/Simulink仿真

Research on Fuzzy PI Control Strategy of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Ant Colony Algorithm

Zijian Zheng

School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Oct. 26th, 2024; accepted: Nov. 19th, 2024; published: Nov. 26th, 2024

Abstract

In the vector control of the three permanent magnet synchronous motors, the traditional PI control performs poorly in the changing dynamic system due to the fixation of its parameters, and is prone to overshoot, distortion and other effects, and the use of fuzzy PI control can effectively improve the

文章引用: 郑子健. 基于蚁群算法的永磁同步电机模糊PI控制策略研究[J]. 建模与仿真, 2024, 13(6): 6343-6354.

DOI: 10.12677/mos.2024.136581

defects in the traditional PI control, such as the inability to adapt to different torques. However, the selection of quantization factor and scale factor in fuzzy PI control is too dependent on experience, so this paper proposes a fuzzy PI controller based on ant colony algorithm optimization, and uses MATLAB/Simulink software to simulate, analyzes the images of the optimized speed, electromagnetic torque and three currents under different control modes, and finally obtains that the fuzzy PI controller optimized by ant colony algorithm has good simulation effect compared with the traditional PI controller, and meets the high accuracy requirements of the three permanent magnet synchronous motors, responding quickly to demand and the need for stable output.

Keywords

Three-Part Permanent Magnet Synchronous Motor, Pi Control, Fuzzy Control, Ant Colony Algorithm, MATLAB/Simulink Simulation

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

三相永磁同步电机(PMSM)作为工业生产中常用的伺服电机具有体积小、损耗小、效率高等特点,近年来随着材料等技术的不断发展,三相永磁同步电机在民用、航空航天等诸多领域广泛应用。但是,由于其具有的多变量、强耦合、非线性和变参数等特点,使得对于三相永磁同步电机的性能控制十分困难,需要采取一定的控制算法,随着现代控制理论的逐步发展,矢量控制理论的出现使得电机控制进入到一个新的时代。对于三相永磁同步电机矢量控制而言,通常由速度环控制、电流环控制、PWM 算法控制三部分组成。在旋转坐标系下的电机速度环控制,常用的方法是使用 PI 调节器进行控制。

传统 PID 控制由于其响应速度快、控制精度高等特点广泛应用于温度、压力控制及机器人运动、路径控制等诸多控制领域,但由于其具有在非线性、时变、不确定系统中控制效果不佳以及在复杂系统中需要进行大量调试等劣势,仍具有许多改进空间。文献[1]使用 T-S 模糊系统利用其在确定情况下逼近任意非线性系统的特点,在隶属度函数的帮助下进行模糊控制;文献[2]通过引入遗传算法,对模糊控制器进行优化,使其具有振动幅度小、鲁棒性好等特点;文献[3]应用改进粒子群算法进行 PI 控制器参数寻优,提升控制精度,加快响应速度。本文通过建立三相永磁同步电机的数学模型,利用蚁群算法优化速度环模糊 PI 控制器,以达到对电机系统优化的作用。

2. 三相永磁同步电机的数学建模

2.1. 自然坐标系下数学模型

在建立三相永磁同步电机数学模型之前,为简化分析,在假设三相永磁同步电机为理想电机的前提下,且应满足以下几个条件:忽略电机铁芯饱和;不计电机中的涡流和磁滞损耗;电机中的电流为对称的三相正弦波电流[4]。在满足上述条件的情况下,建立自然坐标下的永磁同步电机三相电压方程为

$$u_{3s} = Ri_{3s} + \frac{d}{dt}\psi_{3s} \quad (1)$$

磁链方程为

$$\psi_{3s} = L_3 i_{3s} + \psi_f \cdot F_{3s}(\theta_e) \quad (2)$$

电磁转矩为

$$T_e = \frac{1}{2} p_n \frac{\partial}{\partial \theta_m} (\mathbf{i}_{3s}^T \cdot \Psi_{3s}) \quad (3)$$

电机的机械运动方程为

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T_L - B\omega_m \quad (4)$$

其中： Ψ_{3s} 为三相绕组磁链， $\mathbf{u}_{3s}$ 、 $\mathbf{R}$ 、 $\mathbf{i}_{3s}$ 分别为三相绕组的相电压，电阻和电流； $\mathbf{L}_{3s}$ 为三相绕组的电感； $\mathbf{F}_{3s}(\theta_e)$ 为三相绕组的磁链； p_n 为三相永磁同步电机极对数； ω_m 为电机的机械角速度； J 为转动惯量； B 为阻尼系数； T_L 为负载转矩。

由上面四式可以看出，三相永磁同步电机的数学模型是一个复杂且强耦合的多变量系统，为方便下面的研究，需选择合适的坐标变换对数学模型进行解耦和降价变换。

2.2. 同步旋转坐标系下的数学建模

为了简化永磁同步电机的数学模型，通常使用静止坐标变换(Clark 变换)和同步旋转坐标变换(Park 变换)，他们之间的关系如图 1 所示。

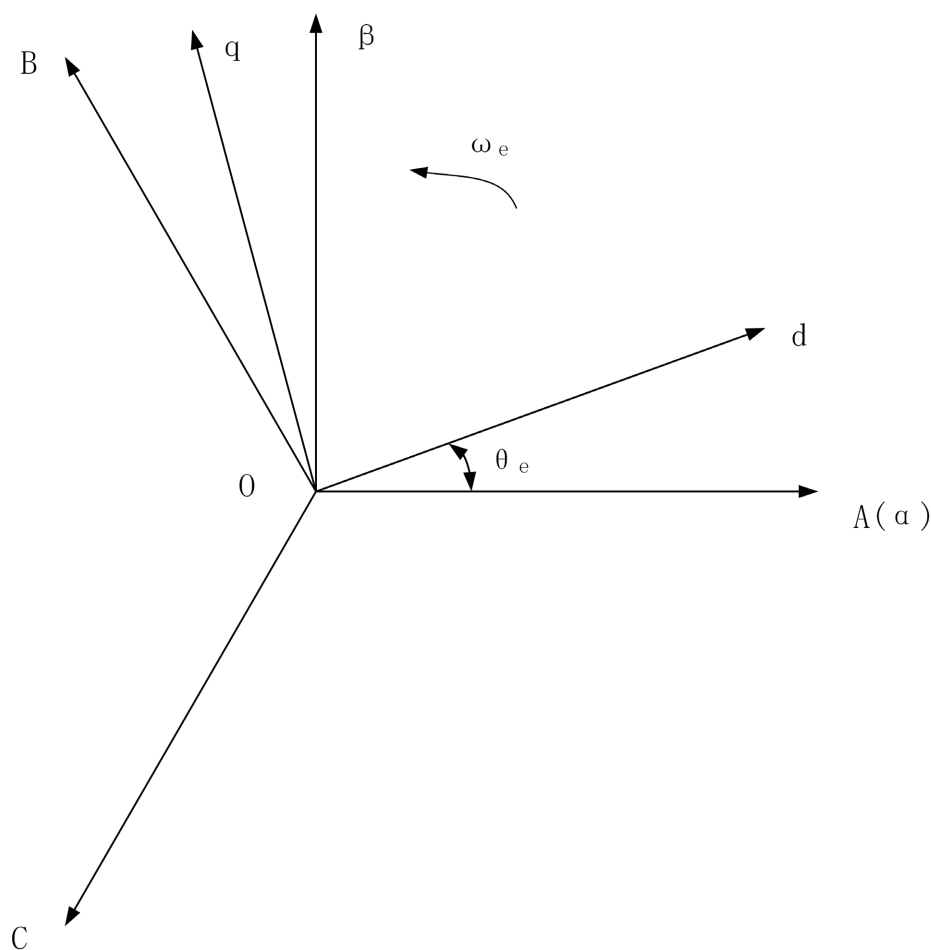


Figure 1. A diagram of the relationship between coordinate systems

图 1. 各坐标系之间关系图

其中 Clark 变换指的是将自然坐标系 ABC 变换到静置坐标系 $\alpha\text{-}\beta$ 的坐标系, 反之被称作反 Clark 变换, Clark 变换的坐标变换公式为

$$\begin{bmatrix} f_\alpha & f_\beta & f_0 \end{bmatrix}^T = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_A & f_b & f_c \end{bmatrix}^T \quad (5)$$

将静置坐标系 $\alpha\text{-}\beta$ 变换到同步旋转坐标系 $d\text{-}q$ 的坐标变换为 Park 变换, 反之被称作反 Park 变换, Park 变换的坐标变换公式为

$$\begin{bmatrix} f_d & f_q \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \cos \theta_e & \sin \theta_e \\ -\sin \theta_e & \cos \theta_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_\alpha & f_\beta \end{bmatrix}^T \quad (6)$$

由公式(5)和公式(6)可以得出, 将自然坐标系 ABC 变换到同步旋转坐标系 $d\text{-}q$, 各个变量的关系为

$$\begin{bmatrix} f_d & f_q & f_0 \end{bmatrix}^T = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta_e & \cos \left(\theta_e - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta_e + \frac{2\pi}{3} \right) \\ -\sin \theta_e & -\sin \left(\theta_e - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left(\theta_e + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_A & f_b & f_c \end{bmatrix}^T \quad (7)$$

其中, f 指代电机电压、电流磁链等变量。

为便于解耦操作, 选取 $d\text{-}q$ 坐标系下永磁同步电机数学模型, 定子电压方程为

$$\begin{cases} u_d = R_{id} + \frac{d}{dt} \psi_d - \omega_e \psi_q \\ u_q = R_{iq} + \frac{d}{dt} \psi_q + \omega_e \psi_d \end{cases} \quad (8)$$

定子磁链方程为

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \psi_f \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (9)$$

将公式(9)带入公式(8)中, 可得解耦后的永磁同步电机电压方程

$$\begin{cases} u_d = R i_d + L_d \frac{d}{dt} i_d - \omega_e L_q i_q \\ u_q = R i_q + L_q \frac{d}{dt} i_q + \omega_e (L_d i_d + \psi_f) \end{cases} \quad (10)$$

其中 u_d 、 u_q 分别是定子电压的 $d\text{-}q$ 轴分量; i_d 、 i_q 分别是定子电流的 $d\text{-}q$ 轴分量; R 是定子的电阻; ψ_d 、 ψ_q 为定子磁链的 $d\text{-}q$ 轴分量; ω_e 是电角速度; L_d 、 L_q 分别是 $d\text{-}q$ 轴电感分量; ψ_f 代表永磁体磁链。根据公式(10)可以得到电机的电压等效电路, 如图 2 所示, 可以看出, 三相永磁同步电机的数学模型已经实现完全解耦[5]。

此时电磁转矩方程为

$$T_e = \frac{3}{2} p_n i_q \left[i_d (L_d - L_q) + \psi_f \right] \quad (11)$$

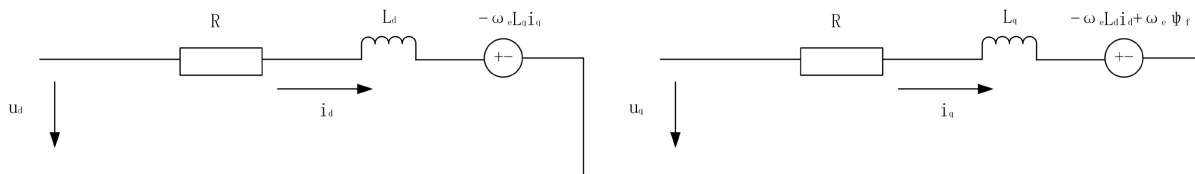


Figure 2. Voltage equivalent circuit diagram of a three-part permanent magnet synchronous motor

图 2. 三相永磁同步电机的电压等效电路图

其中 T_e 为电磁转矩， p_n 为极对数。

由公式(8)至公式(11)，完成对三相永磁同步电机在同步旋转坐标系下的数学建模。

3. 三相 PMSM 模糊 PI 控制

3.1. 模糊控制基本原理

PI 控制是根据误差进行调节，通过设置比例系数 K_p 与积分系数 K_i 的值来实现反馈控制，在传统的 PI 控制中，有时固定的比例系数与积分系数并不能得到我们想要的结果，导致系统稳定性不佳。模糊 PI 控制通过将大量的专家知识与方法通过语言变量表述，同时利用模糊语句形成规则，归纳成为控制算法 [6]。这种控制算法不需要精准的数学模型，通过不同维度的模糊控制器来实现，在三相永磁同步电机的速度环控制中采用二维模糊控制器，其控制方法如图 3 所示。

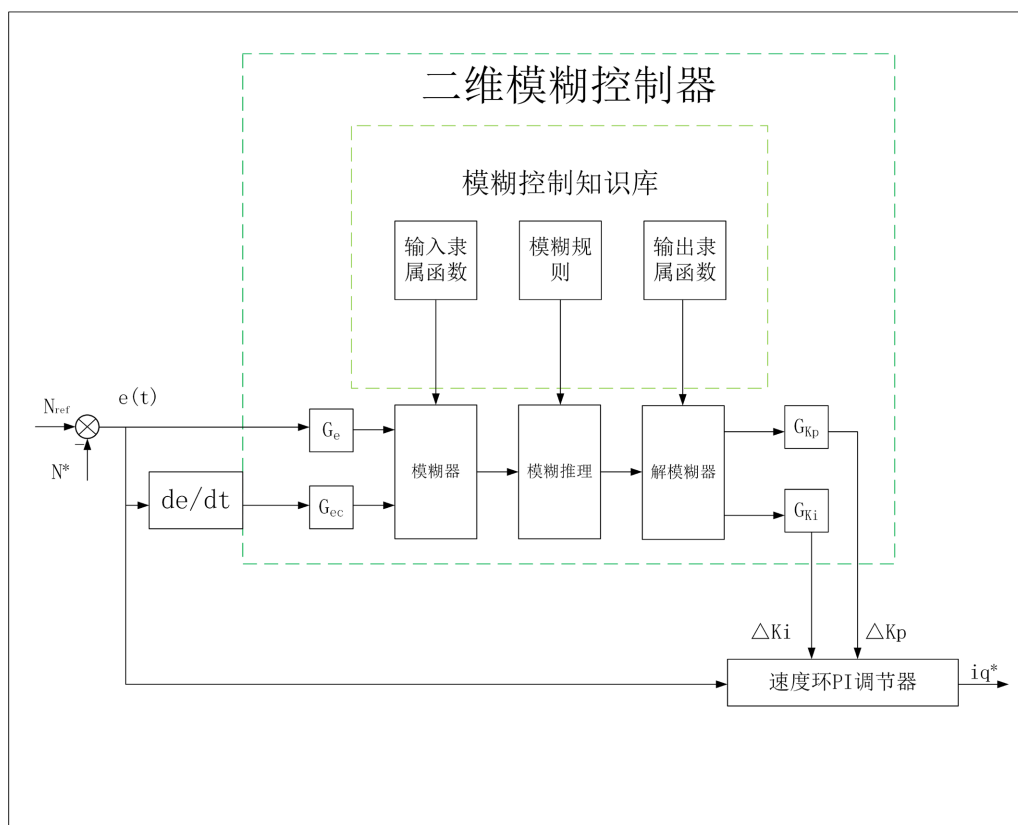


Figure 3. Speed loop fuzzy PI regulator

图 3. 速度环模糊 PI 调节器

其中， G_e 与 G_{ec} 为量化因子， G_{kp} 与 G_{ki} 为比例因子。二维模糊设计器以期望转速 N_{ref} 与实际转速 N^*

的误差 e 及其导数 ec 为输入，经过量化因子将输入量化到隶属函数的范围之内，接着进行模糊化，模糊推理，以及反模糊化，最后通过比例因子得到 ΔKp 与 ΔKi 对速度环 PI 调节器进行优化。

3.2. 三相 PMSM 模糊控制器设计

首先定义模糊输入 e 及其导数 ec ，模糊输出 ΔKp 与 ΔKi 的模糊子集按照{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}进行划分，这七个子集代表：负大、负中、负小、零、正小、正中以及正大[7]。模糊输入 e 及其导数 ec ，模糊输出 ΔKp 与 ΔKi 的论域均为[-3, 3]。他们的隶属度函数曲线如图 4，图 5 所示。

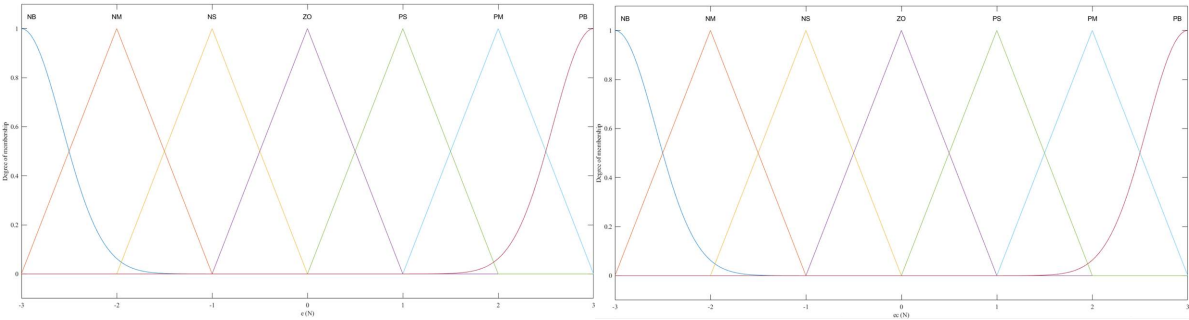


Figure 4. Fuzzy input e and ec membership function curves
图 4. 模糊输入 e 、 ec 隶属函数曲线

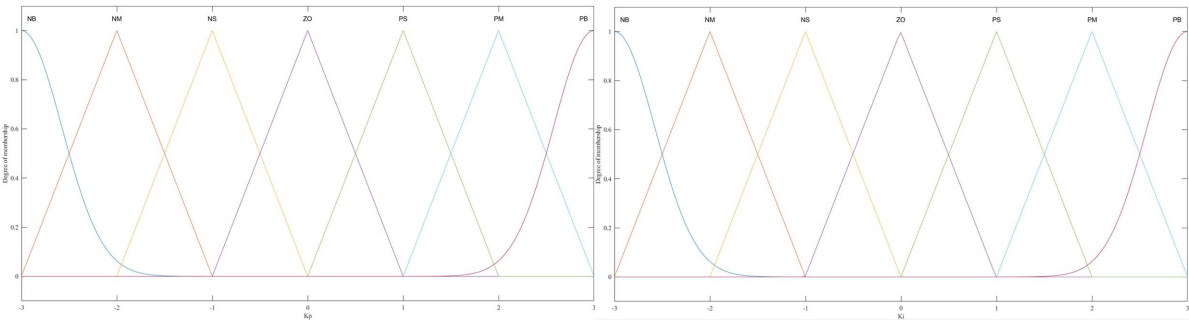


Figure 5. Fuzzy output Kp and Ki membership function curves
图 5. 模糊输出 Kp 、 Ki 隶属函数曲线

在 PI 控制中，比例系数与积分系数分别作用于系统的响应速度和稳态偏差。在熟悉速度环 PI 参数要求与三相 PMSM 性能特点的情况下，通过专家知识总结与仿真实验总结，得到表 1 所示的模糊规则表，通过模糊控制表，将输入变量的模糊集合映射到输出变量的模糊集合，从而实现控制系统的控制。

Table 1. Fuzzy rule control table
表 1. 模糊规则控制表

e/ec	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB/NB	PB/NB	PM/NM	PS/NS	PS/NS	ZO/ZO	ZO/ZO
NM	PB/NB	PM/NB	PM/NM	PS/NS	PS/NS	ZO/ZO	NS/ZO
NS	PM/NB	PM/NM	PM/NS	PS/NS	ZO/ZO	NS/PS	NS/PS
ZO	PM/NM	PS/NM	PS/NS	ZO/ZO	NS/PS	NM/PM	NM/PM
PS	PS/NM	PS/NS	ZO/ZO	NS/PS	NM/PS	NM/PM	NM/PB
PM	PS/ZO	ZO/ZO	NS/PS	NM/PS	NM/PM	NM/PB	NB/PB
PB	ZP/ZO	ZO/ZO	NM/PS	NM/PM	NM/PM	NB/PB	NB/PB

通过在 MATLAB 软件上对模糊规则进行编译,可以得到模糊规则推理下的输出变量输出平面,如图 6 所示,通过将该模糊规则应用在三相 PMSM 仿真上,可以有效优化速度环 PI 调节器。

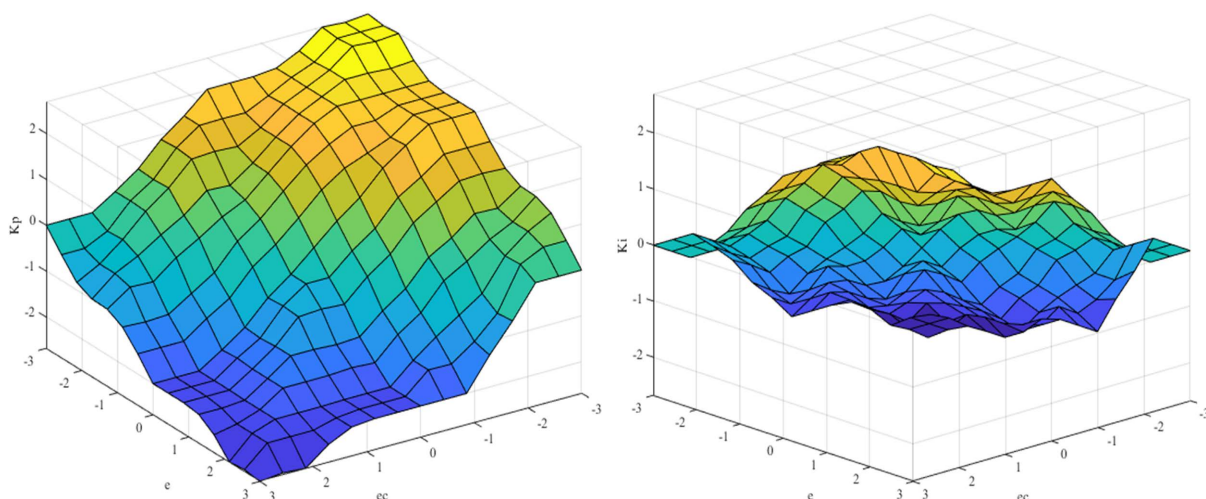


Figure 6. Fuzzy output K_p , K_i inference output plane

图 6. 模糊输出 K_p 、 K_i 推理输出平面

接着使用 Simulink 对模糊 PI 控制器进行仿真,如图 7 所示。其中在 Fuzzy Logic Controller 模块里导入设定好的模糊规则进行模糊化和反模糊化,最后将模糊控制的结果输出到速度环 PI 控制器中。

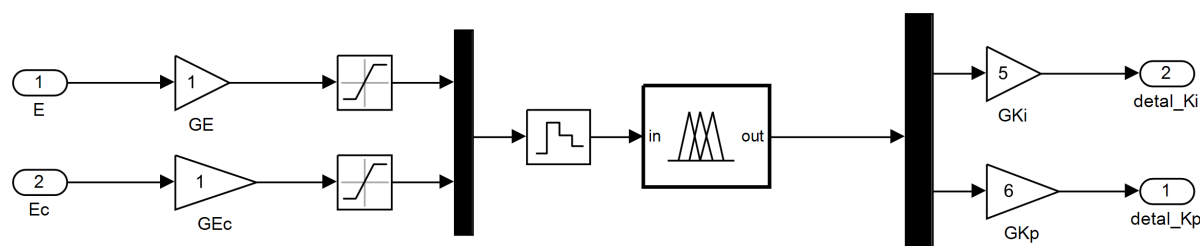


Figure 7. Fuzzy control module

图 7. 模糊控制模块

4. 蚁群算法基本原理

蚁群算法的原理是通过模拟自然界中蚂蚁的觅食行为,蚂蚁在寻找食物的过程中释放可被其他蚂蚁感知的信息素,这种信息素的浓度大小表示距离的远近,信息素浓度越强代表距离越近,反之距离越远,信息素浓度会随着时间的推移逐渐缩减。通常蚂蚁会以较大概率优先选择信息素浓度较高的路径,同时继续释放信息素以加强信息素浓度,以形成正反馈。随着一条路径上的信息素浓度逐渐增大,蚂蚁会找到一条最短的觅食路径[8]。这种算法拥有的特征包括分步计算、信息正反馈与启发式搜索,是一种启发式全局优化算法。

蚁群算法的基本思想是把蚂蚁每一个行走的路径表示为优化问题的可行解,它的解空间就是整个蚂蚁群体所有路径的集合。假设整个种群中的蚂蚁数量为 m ,蚂蚁经过的总城市数量为 n ,两个城市 i 与 j 之间的距离 d_{ij} ($i, j = 1, 2, \dots, n$),时刻 t 城市 i 与 j 路径上的信息素浓度为 $\tau_{ij}(t)$,表示随着时间变化,信息素浓度逐渐衰减,各个城市之间的信息素浓度初始相同,设初始时刻为 $\tau_{ij}(0) = \tau_0$ 。蚂蚁 k ($k = 1, 2, 3, \dots, m$) 通过不同路径上的信息素浓度来决定下一个访问的城市,它的概率 $p_{ij}^k(t)$ 的计算公式为

$$p_{ij}^k = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{s \in allow_k} [\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}(t)]^\beta}, & s \in allow_k \\ 0, & s \notin allow_k \end{cases} \quad (12)$$

其中 $\eta_{ij}(t)$ 为启发函数, $\eta_{ij}(t) = \frac{1}{d_{ij}}$, 表示蚂蚁从城市 i 到城市 j 的期望度。 $allow_k$ ($k = 1, 2, \dots, m$) 为蚂蚁 k 待访问的城市集合, 开始时为 $(m-1)$, 即除了初始城市之外的所有城市, 最终当蚂蚁访问完所有的城市之后, 值为空。 α 为信息素浓度重要因子, 它的值越大, 信息素浓度在蚂蚁转移中起到的作用就越大; β 为启发函数重要程度因子, 它的值越大, 启发函数在蚂蚁转移中起到的作用就越大。

此外, 当所有蚂蚁进行完一次迭代后, 对本次迭代中最好的路径 T_{best} 进行信息素更新, 它的公式为

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-\rho)\tau_{ij}(t) + \psi(l)\Delta\tau_{ij}^{bs} \quad (13)$$

其中 $0 < \rho < 1$ 是信息素更新参数, $\Delta\tau_{ij}^{bs}$ 为所走路径的信息素增量。蚁群算法的一般流程如图 8 所示:

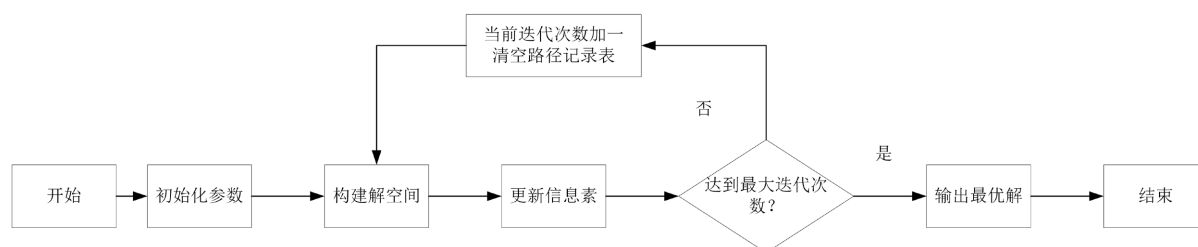


Figure 8. The general flow of the ant colony algorithm

图 8. 蚁群算法的一般流程

在模糊 PI 控制中, 在量化因子和比例因子的选择上有着明显的缺点, 量化因子和比例因子的调整往往依赖于经验, 这将会导致其不同系统中的适应性差, 在调试时也可能无法第一时间得到合适的结果,

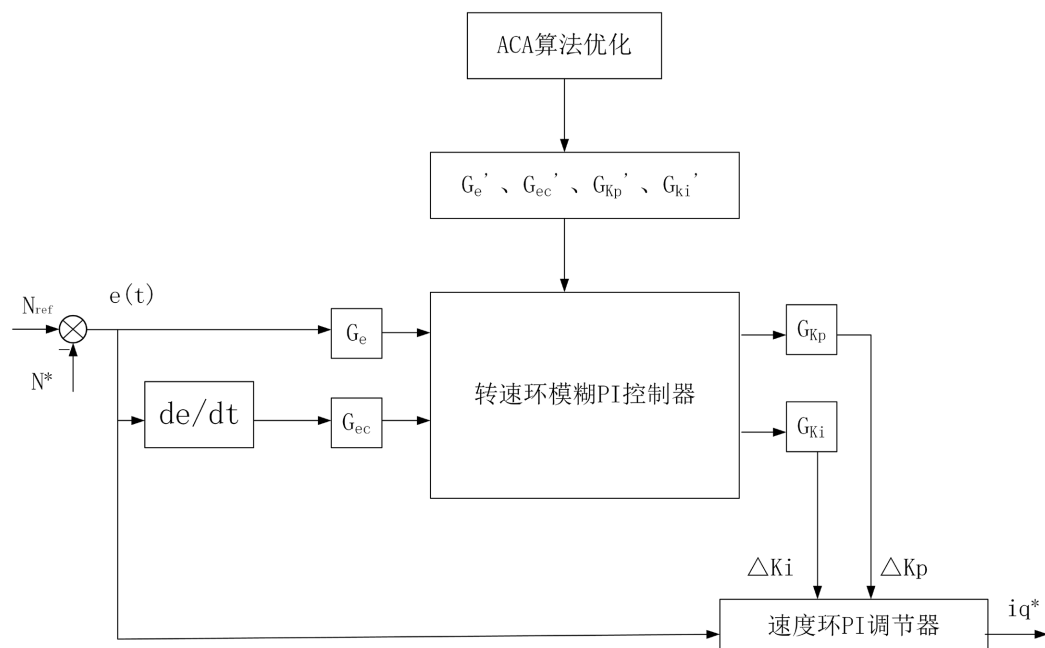


Figure 9. Ant colony algorithm optimizes fuzzy PI controller block diagram

图 9. 蚁群算法优化模糊 PI 控制器框图

问下一个城市[9]。最终的仿真模型如图 11 所示。

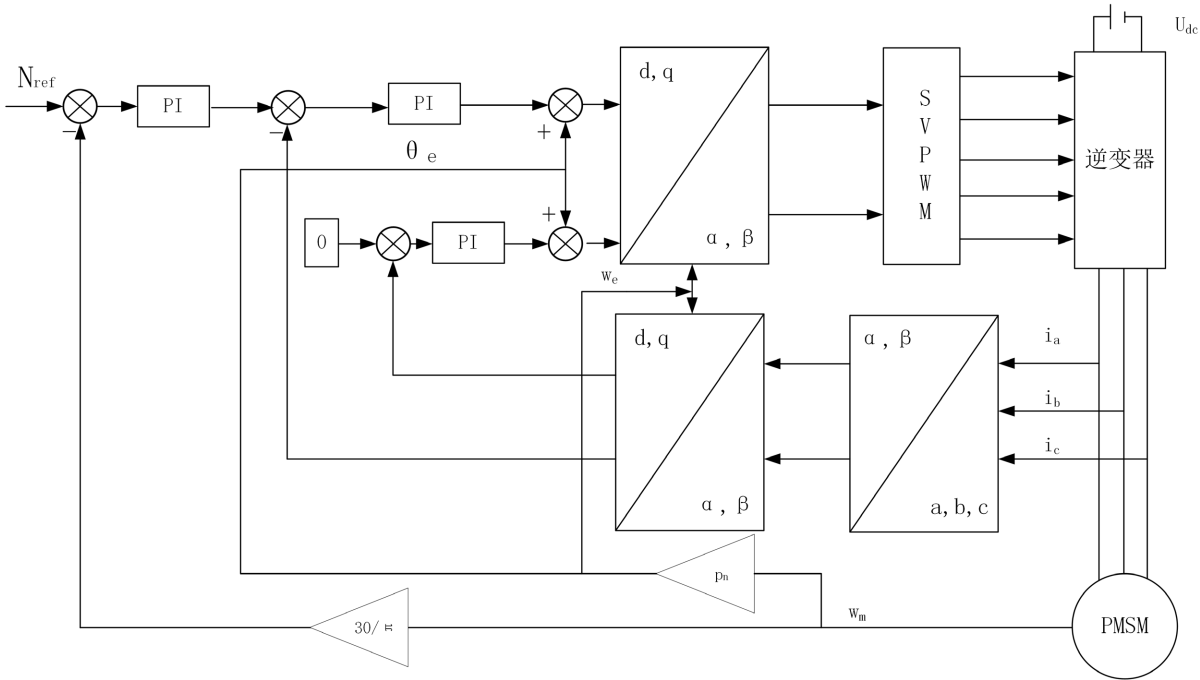


Figure 11. Simulation of vector control model of three permanent magnet synchronous motors

图 11. 三相永磁同步电机矢量控制模型仿真

仿真结果同传统 PI 控制，模糊 PI 控制在相同仿真条件下进行对比，从转速图像(图 12)中可以看出，三种控制方式的转速图像均从 0 开始上升，后平稳在 1000 r/min，中间由于负载转矩的变换而产生震荡。从电磁转矩图像(图 13)可以看出，三种控制方式的电磁转矩均从 0 开始上升，在峰值达到 30 N·m 后下降，最终稳定到 10 N·m；负载转矩变化后，电磁转矩降低至 0。从三相电流曲线图像(图 14)中可以看出，三种控制方式的三相电流曲线在电磁转矩稳定后均为正弦波。

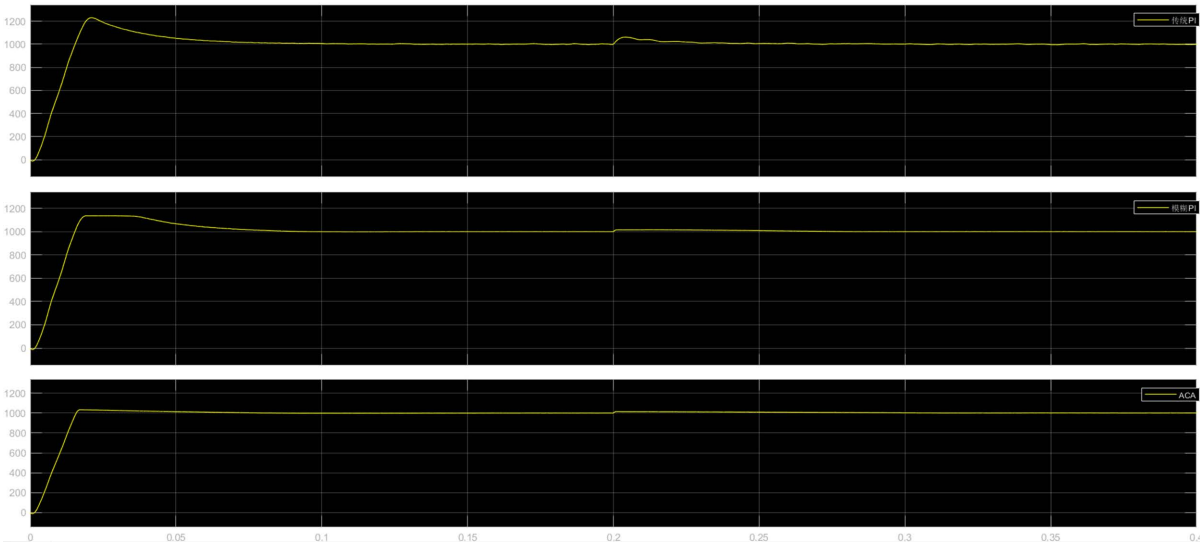


Figure 12. Rotational speed change curve

图 12. 转速变化曲线

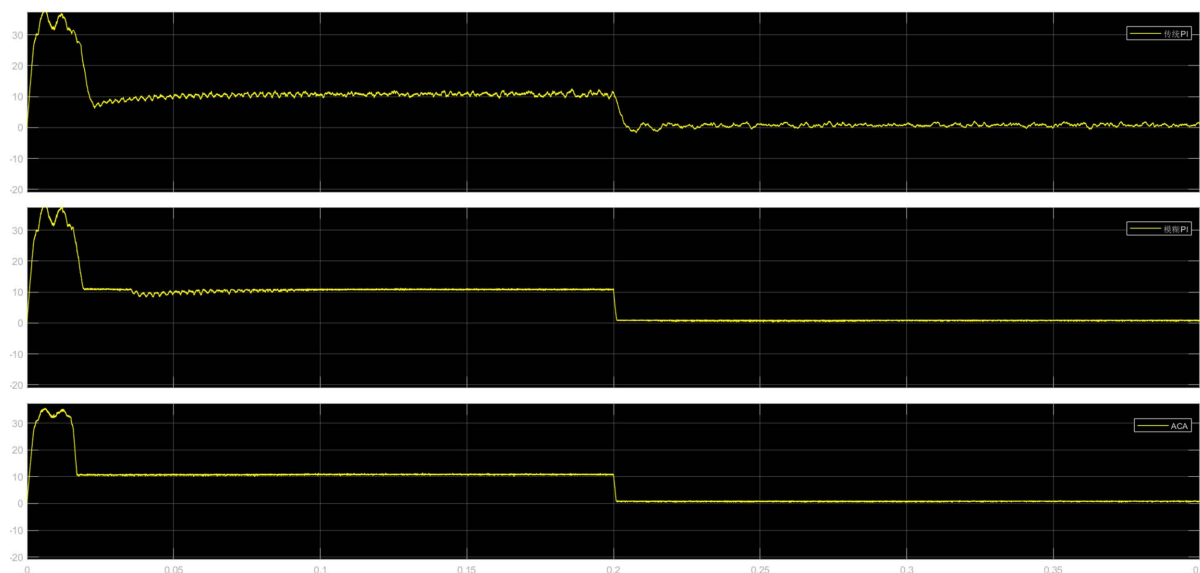


Figure 13. Electromagnetic torque curve

图 13. 电磁转矩变化曲线

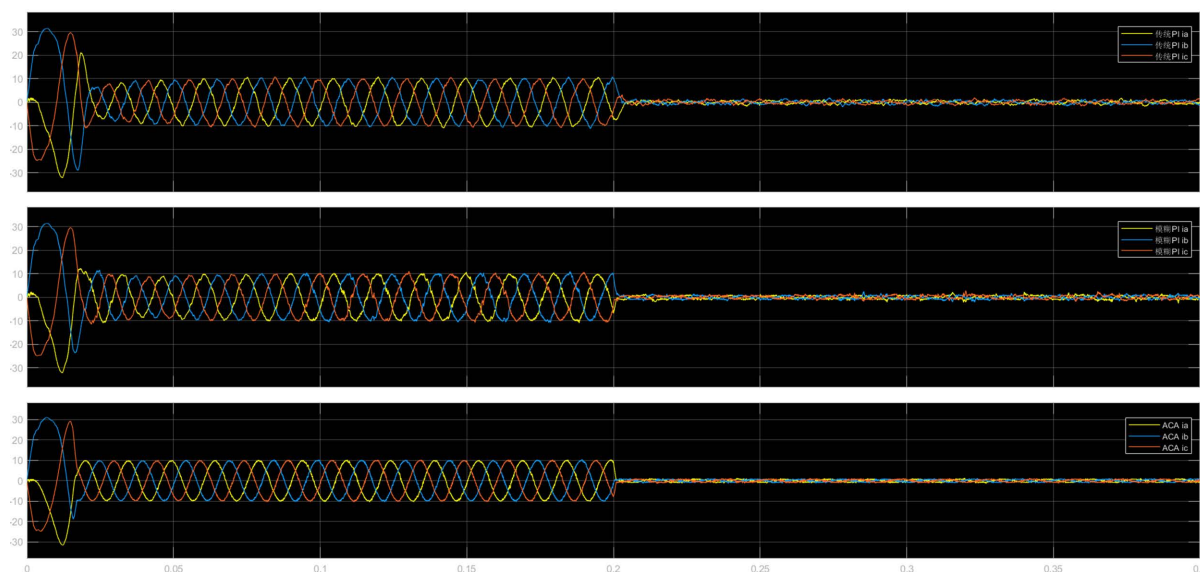


Figure 14. Three current curves

图 14. 三相电流变化曲线

仿真结果同传统 PI 控制，模糊 PI 控制在相同仿真条件下进行对比，从转速图像(图 12)中可以看出，与传统 PI 控制器、模糊 PI 控制器相对比，基于蚁群算法的模糊 PI 优化控制器在转速上升后更快的达到稳定状态，超调量也更小；当负载转矩发生变化时，也能更加快速的恢复到稳定状态。从电磁转矩图像(图 13)可以看出，基于蚁群算法的模糊 PI 优化控制器电磁转矩的波动幅度更小，稳态精度更好；当负载转矩发生变化时，恢复稳态的速度更快。从三相电流变化曲线图像(图 14)来看，基于蚁群算法的模糊 PI 优化控制器电流波形更稳定，且不容易失真。

6. 结论

针对使用传统 PI 控制中易出现响应速度慢、超调以及模糊 PI 控制中量化因子与比例因子的选取过

于依赖经验的问题, 本文提出一种基于蚁群算法优化模糊 PI 控制器的方法, 现得出以下结论:

1) 在转速上升后, 它能够更迅速地达到稳定状态, 超调量显著减小, 表明其控制性能优越。当负载转矩发生变化时, 该控制器也展现出更快的恢复能力, 提升了系统的动态响应性。

2) 优化控制器在电磁转矩方面实现了更小的波动和更高的稳态精度, 确保了系统在各种负载条件下的稳定性。

3) 基于蚁群算法的模糊 PI 优化控制器的永磁同步电机模型三项电流波形更加稳定, 失真程度低。

4) 克服了模糊 PI 控制在比例因子和量化因子选取上的经验依赖。

这些仿真结果充分表明, 采用蚁群算法优化模糊 PI 控制器, 不仅提升了整体系统的性能, 也为模糊控制器参数的科学优化提供了有效的方法, 具有较高的实用价值和推广潜力。

参考文献

- [1] 吴明超. 永磁同步电机速度模糊控制方法的研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 东北大学, 2011.
- [2] 王兵, 李赐图, 李圣清, 等. 基于遗传算法优化的永磁同步电机模糊 PI 控制[J]. 电工电气, 2023(10): 1-6.
- [3] 张帅. 基于改进 PSO 算法的永磁同步电机模糊 PI 控制方法研究[J]. 农业装备与车辆工程, 2024, 62(3): 111-115.
- [4] 王子源. 现代交流电机控制的现状与展望[J]. 中国设备工程, 2021(2): 248-250.
- [5] 袁雷, 胡冰新, 魏克银, 等. 现代永磁同步电机控制原理及 MATLAB 仿真[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2016.
- [6] 王锦浩, 姚磊. 模糊控制和神经网络预测在智能管家系统中的应用研究[J]. 建模与仿真, 2024, 13(3): 2823-2836.
- [7] Ananthababu, P. and Amarendra Reddy, B. (2009) Control of PMDC Motor Using Fuzzy PI Controller. 2009 *International Conference on Control, Automation, Communication and Energy Conservation*, Perundurai, 4-6 June 2009, 1-4.
- [8] Zhang, C. and Lu, Y. (2006) The Improved Ant Colony Algorithm Based on Immunity System Genetic Algorithm and Application. 2006 *5th IEEE International Conference on Cognitive Informatics*, Beijing, 17-19 July 2006, 726-731. <https://doi.org/10.1109/coginf.2006.365579>
- [9] 李想, 董玉民. 一种优化的量子蚁群算法在旅行商问题上的应用[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2022, 39(5): 127-133.