

一种模糊 PI 控制器参数 IPSO 寻优的 PMSM 控制方法研究

李美琪¹, 欧阳奇², 张兴兰¹, 谢 鹏¹, 黄碧媛¹

(1. 重庆理工大学 计算机科学与工程学院, 重庆 400054;

2. 重庆大学 自动化学院, 重庆 400044)

摘要: 针对传统模糊 PI 控制器控制参数固定不变而造成控制性能较差以及系统自适应能力下降的问题, 提出了一种基于改进粒子群的模糊 PI 控制器参数寻优方法; 使用模糊控制器改善 PI 的参数, 随后应用引入 Arctan 函数自适应惯性权重来优化粒子群算法的全局特性, 进而寻找到模糊控制中量化因子和比例因子的最优值, 以使系统达到更好的控制效果; 在 Matlab/Simulink 下搭建 PMSM 矢量控制调速仿真模型, 通过 3 种工况验证所提控制方法的有效性; 仿真结果表明, 基于改进粒子群算法寻优的模糊 PI 控制方法与传统模糊 PI 控制和标准粒子群模糊 PI 控制相比, 无负载以 1 000 r/min 启动, 0.04 s 转速降为 800 r/min 时其调节时间、超调量、稳态误差分别下降 52.1%, 98.9%, 82.2% 和 13.9%, 76.9%, 12.5%; 无负载启动, 0.04 s 添加 10 N·m 的负载转矩时其调节时间、超调量、稳态误差分别下降了 60.4%, 59.9%, 33.8% 和 40.2%, 57.3%, 27.2%, 以 12 N·m 的负载启动, 0.04 s 负载转矩突变为 0 N·m 时其调节时间、超调量、稳态误差分别下降了 47.7%, 93.5%, 82.7% 和 11.6%, 85.3%, 43.2%; 该方法提高了永磁同步电机控制系统的动态响应速度, 减少了超调和波动, 使系统达到更好的控制效果。

关键词: PMSM; 改进粒子群优化算法; 模糊 PI 控制; 量化因子; 比例因子; 闭环控制系统

Research on PMSM Control Method for Parameter IPSO Optimization of Fuzzy PI Controller

LI Meiqi¹, OUYANG Qi², ZHANG Xinglan¹, XIE Peng¹, HUANG Biyuan¹

(1. College of Computer Science and Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China;

2. College of Automation, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Traditional fuzzy PI controllers have the characteristic of unchanged control parameters, which results in poor control performance and system adaptive performance degradation. For this issue, a parameter optimization method for fuzzy PI controller based on improved particle swarm optimization is proposed. The fuzzy controller is used to improve the parameters of PI, and the adaptive inertia weight of the Arctan function is introduced to optimize the global characteristics of the particle swarm optimization algorithm, and then find out the optimal values of the quantization factor and the scale factor in the fuzzy control, so that the system can achieve better control effect. The simulation model of permanent magnet synchronous motor (PMSM) vector control speed regulation is built by MATLAB/Simulink, and the effectiveness of the proposed method is verified by three working conditions. Simulation results show that compared with traditional fuzzy PI control and standard particle swarm fuzzy PI control, the fuzzy PI control method based on the improved particle swarm optimization algorithm reduces the adjustment time, overshoot and steady-state error by 52.1%, 98.9%, 82.2% and 13.9%, 76.9%, 12.5% respectively when starting at 1 000 r/min of speed without load and the speed drops to 800 r/min within 0.04 s; When starting without load and adding 10 N·m of load torque in 0.04 s, the adjustment time, overshoot and steady-state

收稿日期:2024-07-02; 修回日期:2024-08-10。

基金项目:国家重点研发计划(2022YFB4702100)。

作者简介:李美琪(2001-),女,硕士研究生。

通讯作者:欧阳奇(1971-),男,博士,教授,博导。

引用格式:李美琪,欧阳奇,张兴兰,等.一种模糊 PI 控制器参数 IPSO 寻优的 PMSM 控制方法研究[J].计算机测量与控制,2025,33(8):137-144.

error are decreased by 60.4%, 59.9%, 33.8% and 40.2%, 57.3%, 27.2%, respectively. When starting with 12 N·m of load torque, the adjustment time, overshoot and steady-state error are decreased by 47.7%, 93.5%, 82.7% and 11.6%, 85.3%, 43.2% respectively when the load torque reaches 0 N·m in 0.04 s. This method improves the dynamic response speed of the permanent magnet synchronous motor control system, reduces the overshoot and fluctuation, and makes the system achieve better control effect.

Keywords: PMSM; improved particle swarm optimization algorithm; fuzzy PI control; quantification factor; scale factor; closed-loop control system

0 引言

永磁同步电机 (PMSM) 以其高效、体积小、噪音低和调速性能好等优点得到了广泛运用。目前, 传统 PMSM 矢量控制方法中转速环采用 PI 控制方法, 虽然 PI 控制器结构简单, 易于实现, 但是在运行过程中容易受到外界负载的影响, 使系统的动态响应能力下降, 难以满足要求, 并且调整参数需要大量时间和精力, 依赖人工经验经常是一项耗时耗力的任务。许多传统的参数整定算法使用低阶模型进行逼近, 难以克服过程约束, 并且很难实现理想的动态性能。文献 [1] 提出了一种新型固定时间终端滑模控制方法, 该方法有效改善永磁同步电机的响应速度, 但参数敏感性高, 计算复杂; 文献 [2] 设计了一种将永磁同步电机速度环上用滑模控制代替传统比例积分 (PI) 控制的新方法, 提升了电机的响应速度, 但计算量较大; 文献 [3] 则在传统 PI 控制上融入模糊控制理论, 利用模糊控制对 PI 控制器进行参数修正, 解决了传统 PI 控制不能满足复杂环境的需求, 但参数调节依赖人工经验, 费时费力; 文献 [4] 提出了一种自适应模糊比例积分控制方案, 通过设计的自适应模糊调谐器实现在线优化。为了进一步提高系统动态响应能力和控制性能, 众多学者提出通过遗传算法来实现参数整定。文献 [5] 提出了一种果蝇优化模糊 PI 控制方法, 利用果蝇优化算法对模糊 PI 控制参数进行全局优化, 得到模糊 PI 控制量化因子和比例因子的最优解, 使系统的动态响应速度更快, 但果蝇优化算法对初始参数设定敏感, 并且算法复杂性较高; 文献 [6] 提出了一种基于遗传算法优化模糊 PID 参数的控制方法, 提高了步进电机的控制精度和动态响应速度, 但计算复杂性高, 收敛速度慢; 文献 [7] 针对电动舵机系统模糊 PID 控制器中量化因子和比例因子的选取过于依赖经验、参数固定等缺点, 利用遗传算法可全局寻优的能力, 提出基于遗传算法的模糊 PID 控制方法, 该方法改善了电动舵机的动态响应能力, 但遗传算法局部搜索能力较弱, 并且收敛速度较慢; 文献 [8] 提出采用粒子群优化算法对模糊控制器参数量化因子和比例因子进行优化, 增强了控制器的自适应能力, 提高了控制精度和动态响应速度; 文献 [9] 将基于 Bouc-Wen

逆模型的前馈控制与模糊 PI 控制相结合, 设计了复合控制器。然后, 利用粒子群优化算法对模糊 PI 参数进行调整, 提高了动态响应速度。

尽管粒子群算法具有简单易实现、参数调节少、收敛速度快等优点, 但相较于遗传算法、蚁群算法等其他优化算法, 它也有着面对复杂优化问题时容易早熟, 陷入局部最优的挑战。因此, 相关学者通过改进标准粒子群优化算法, 以增强其优化能力。改进主要集中在惯性权重、多种优化算法混合等方面进行^[10-11]。

本文引入基于 Arctan 函数的自适应惯性权重调整方式, 通过动态调整惯性权重来避免粒子群算法早熟和陷入局部最优解。并将该方法应用于模糊 PI 控制器参数寻优上, 通过改进粒子群优化算法寻找到模糊控制中量化因子和比例因子最佳搭配值, 相比于传统模糊 PI 控制使系统调节速度更快, 调节精度更高。

1 永磁同步电机矢量控制

依据双轴原理, 通过 CLACK 变换将三相系统 (在 ABC 坐标系中) 的时域部分转换为正交静止坐标系中的两个分量。再通过 PACK 变换, 将静止坐标系中的两个分量转换为旋转坐标系中的两个分量, 从而优化 PMSM 的数学模型解耦和降级。在两相同步旋转坐标系下, 建立数学模型即:

$$\begin{cases} U_d = R i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e L_q i_q \\ U_q = R i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + (L_d i_d + \varphi_f) \\ T_e = \frac{3}{2} p_n [\varphi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \end{cases} \quad (1)$$

式中, U_d , U_q 分别为两相旋转坐标系的定子电压分量, i_q , i_d 分别为定子电流分量, ω_e 为电角速度, L_d , L_q 分别为 d , q 轴的电感, T_e 为电磁转矩, φ_f 为磁链, p_n 为电极数, R 为定子电阻。

矢量控制系统首先通过给定转速 N_r 和实际转速 N 之间的误差, 由改进粒子群优化算法 (IPSO) 优化模糊 PI 控制器生成目标电流 i_q^* , 并保持目标 $i_d^* = 0$ 以实现最大转矩电流比。电流环通过对比实际电流 i_q , i_d 以及目标值的差异, 通过 PI 控制器调整控制信号。随后, 三相电流 i_a , i_b , i_c 经由 Clack 和 Park 变换被转化为静止坐标系 (α , β) 和旋转坐标系 (d , q) 的电流分量,

解耦控制规则实现动态调节。接着, 通过 Park 逆变换和空间矢量脉宽调制 (SVPWM) 模块将控制信号生成 PWM 信号, 驱动三相逆变器调整电压, 并结合速度和位置反馈, 精确控制这些分量以实现电机的转矩和转速控制, 控制策略如图 1 所示。

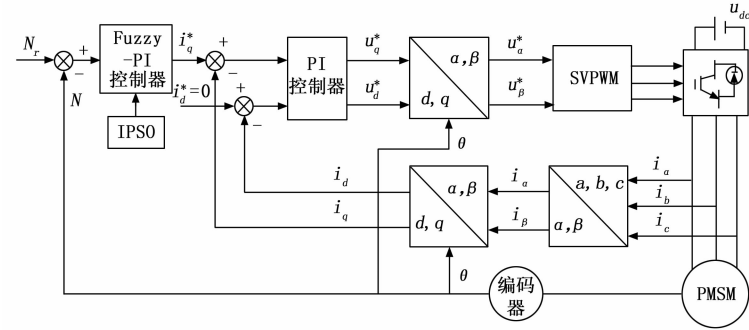


图 1 双闭环矢量控制框图

图 1 中, N_r 为目标转速, N 为实际转速, α, β 为矢量控制中两相正交静止坐标系, d, q 为旋转坐标系。

2 模糊 PI 控制器设计

2.1 模糊 PI 控制器结构

传统的 PI 控制器采用固定参数, 在面对复杂的 PMSM 控制系统时, 其控制性能往往难以达到预期效果。通过将模糊控制技术应用于优化 PI 的两个参数可以提升控制效果。模糊 PI 控制器结合了模糊控制和 PI 控制的优点, 能够对 PI 参数进行实时调整, 从而有效改进控制性能^[12-13]。采用模糊 PI 的控制器结构原理如图 2 所示。

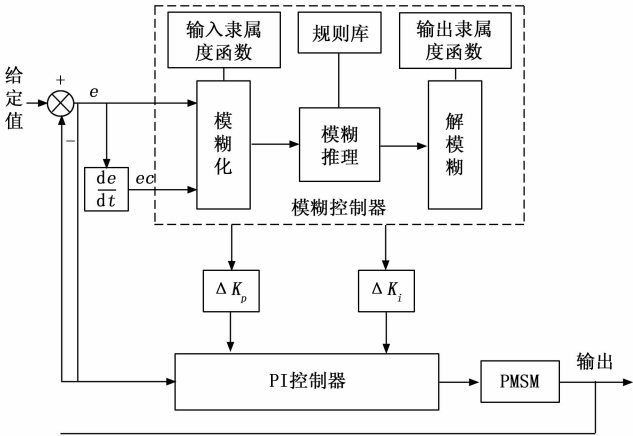


图 2 模糊 PI 控制器结构图

图 2 中, e, ec 分别为偏差及偏差的导数, ΔK_p 和 ΔK_i 为经过模糊控制的 PI 参数修正值。

经过控制器修正后的比例系数和积分系数为:

$$\begin{cases} K_p = K_p^0 + \Delta K_p \\ K_i = K_i^0 + \Delta K_i \end{cases} \quad (2)$$

式中, K_p^0 和 K_i^0 为 PI 参数的初始值, ΔK_p 和 ΔK_i 为

经过模糊控制的 PI 参数修正值, K_p 和 K_i 为修正之后的 PI 参数值。

2.2 隶属度函数与论域

在进行模糊推理时, 控制器的输入为永磁同步电机的转速误差的变化率和转速误差, 输出为 PI 控制器调整后的, 参数。输入的论域设置为 $\{-6, 6\}$, 模糊参数设置 7 个, 其中包括 $\{NB$ (负大)、 NM (负中)、 NS (负小)、 ZO (零)、 PS (正小)、 PM (正中)、 PB (正大) $\}$, 输出的论域设置为 $\{-3, 3\}$, 对应的模糊子集为 $\{ZO$ (零)、 PS (正小)、 PM (正中)、 PB (正大) $\}$ 。其中 NB 和 PB 采用高斯型隶属度函数, 其余采用三角形隶属度函数。

2.3 模糊规则设计

输入不同的电压误差以及误差的变化率对于 PI 控制器的参数调整方向是不同的。电压误差过大时, 会导致系统响应迟缓, 同时也会使系统初始状态时产生较大的超调量, 此时 PI 控制器设置较大的 K_p 值, 较小的 K_i 值。随着电压误差逐渐减小时, 在保证系统响应速度的前提下降低超调量, 此时 K_p 应取较小的值, K_i 应取较大的值^[14]。根据上述 PI 参数变化特点和专家实验经验得出模糊规则表如表 1 所示。

表 1 ΔK_p 的模糊规则

ΔK_p		EC						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
E	NB	PM	PB	PB	PB	PB	PB	PM
	NM	PS	PM	PM	PM	PM	PM	PS
	NS	PS	PS	PM	PM	PM	PS	PS
	ZO	PM	PB	PB	PB	PB	PB	PM
	PS	PS	PS	PM	PM	PM	PS	PS
	PM	PS	PM	PM	PM	PM	PM	PS
	PB	PM	PB	PB	PB	PB	PB	PM

表 2 ΔK_i 的模糊规则

ΔK_i		EC						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
E	NB	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
	NM	PS	PS	ZO	ZO	ZO	PS	PS
	NS	PM	PM	PB	PB	PB	PM	PM
	ZO	PB	PB	PB	PS	PB	PB	PB
	PS	PM	PM	PB	PB	PB	PM	PM
	PM	PS	PS	ZO	ZO	ZO	PS	PS
	PB	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO

2.4 解模糊

对于上述步骤得到的模糊规则结果, 还需要对它进行解模糊处理, 将进一步处理后的结果, 得出 K_p 和 K_i 的精确数值, 在解模糊处理的时候, 常用的方法有最大

隶属度法、重心法和中位数法等, 本文采用重心法计算各输出量的量化值, 其公式如下:

$$U = \frac{\sum_{i=0}^n M_i * F_i}{\sum_{i=0}^n M_i} \quad (3)$$

式中, U 为经过模糊控制量在论域内的值, F_i 为模糊控制量在论域内的值, M_i 为对应 F_i 的隶属度的值, $n = 7$ 。

模糊控制算法中的量化因子和比例因子是控制系统设计中用来调整输入信号和输出信号的重要参数。量化因子和比例因子的选择不仅影响控制系统的灵敏度和精确度, 还直接影响到系统的稳定性和响应时间^[15]。量化因子和比例因子过大, 系统会出现明显地超调和振荡, 过小会对系统收敛速度产生影响^[16-17]。并且传统模糊 PI 控制器中量化因子和比例因子的值主要依赖专家经验, 这使得系统控制性能不高。因此, 本文提出改进粒子群算法模糊 PI 控制方法, 实现模糊控制器中量化因子和比例因子的最优分配, 以使系统的动态响应能力和控制性能有所提高。

3 基于改进粒子群算法的模糊 PI 控制

3.1 基于改进粒子群算法的模糊 PI 控制器设计

改进粒子群算法的模糊 PI 控制器的输入为转速误差及误差的变化率, 通过改进粒子群算法找出量化因子 $\alpha(e)$ 、 $\alpha(ec)$ 和比例因子 β_1 、 β_2 的最优值^[18-19], 实现参数的最优分配, 经过量化因子调整后的转速误差以及误差变化率作为模糊控制器的输入, 而模糊控制器的输出经过比例因子转化为实际输出, 具体的结构如图 3 所示。

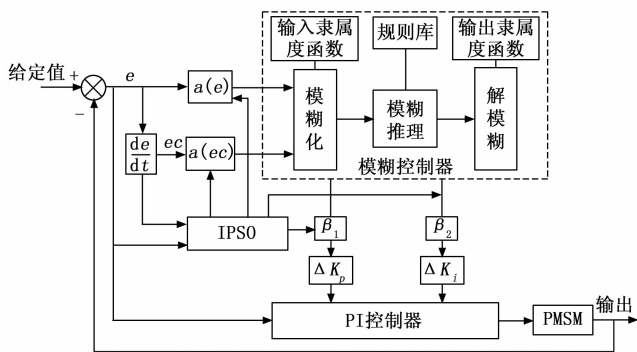


图 3 基于 IPSO 的模糊 PI 控制结构图

图 3 中, e , ec 分别为偏差及偏差的导数, $\alpha(e)$ 、 $\alpha(ec)$ 为待定的量化因子, β_1 、 β_2 为待定的比例因子。

3.2 改进粒子群算法

粒子群优化算法 (PSO, particle swarm optimization) 是一种基于群体智能的优化技术, 具有参数少、算法实现简单等特点, 但基本 PSO 存在易于收敛到局部最优解, 搜索精度不高等问题, 因此引入 Arctan 函

数自适应惯性权重的方法进行改进。PSO 中粒子的速度与位置迭代更新的公式如下:

$$v_i(t+1) = \omega v_i(t) + c_1 r_1 [p_{\text{best}} - x_i(t)] + c_2 r_2 [g_{\text{best}} - x_i(t)] \quad (4)$$

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (5)$$

式中, t 为当前迭代次数; r_1 , r_2 , 为 $[0, 1]$ 上的随机数; p_{best} 为个体最优位置; g_{best} 为群体最优位置; c_1 , c_2 为学习因子, c_1 决定局部搜索能力, c_2 决定全局搜索能力; ω 为惯性权重。

惯性权重是粒子群算法重要的参数, 通常用于平衡局部搜索和全局搜索之间的权衡。在粒子群算法中, 惯性权重通常会与适应度值相关联, 用于调整粒子的速度和搜索行为^[20]。为了提高粒子群优化算法的性能, 引入基于 Arctan 函数的自适应惯性权重调整方式, 反正切函数提供了平滑的权重调整过程, 在函数开始和结束阶段变化缓慢, 而在中间阶段变化相对较快, 这种渐进性的特点使得算法在初始阶段和结束阶段更加稳定地调整搜索策略, 在中间阶段快速地进行权重调整, 并且不需要像线性递减那样单纯依赖于迭代次数, 而是可以更好地适应算法的当前状态和需要。

当个体粒子的适应度好于平均适应度时, 算法采用较大的惯性权重 ω_{max} , 这样的设置鼓励粒子继续沿着当前方向搜索, 有利于全局探索。当个体粒子的适应度不如平均时, 惯性权重使用基于 Arctan 函数的自适应惯性权重调整方式, 这种调整促进了粒子对潜在更好区域的局部搜索。

Arctan 函数的表达式为:

$$\text{Arctan}(x) = \tan^{-1}(x) \quad (6)$$

Arctan 函数的定义域为 $(-\infty, \infty)$, 值域为 $(-1, 1)$ 。为更好控制惯性权重的调整范围和速度, 将 Arctan 函数作如下变换, 从而使适应度值映射到 $(0, 1)$ 区间, 公式如下所示:

$$f(x) = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\arctan(x)}{\pi} \right) \quad (7)$$

基于上述公式的自适应惯性权重变化规则如下式所示:

$$\omega_t =$$

$$\begin{cases} \omega_{\text{max}} * f_j^t \geq f_{\text{average}}^t \\ \omega_{\text{max}} - (\omega_{\text{max}} - \omega_{\text{min}}) \times \frac{1}{2} \left[\frac{1 + (a-b)}{\pi} \right], f_j^t < f_{\text{average}}^t \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} a = \arctan[k(f_j^t - f_{\text{optimal}})] \\ b = \arctan[k(f_{\text{average}}^t - f_{\text{optimal}})] \end{cases} \quad (9)$$

$$f_{\text{average}}^t = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f_i^t \quad (10)$$

式中, ω_t 是粒子第 t 代的惯性权重, ω_{max} , ω_{min} 是惯性权

重的最大值和最小值, 一般取 $\omega_{\max}=0.9$, $\omega_{\min}=0.4$, k 为调整参数, 用来控制 Arctan 函数的斜率, f_j^t 是粒子 j 在第 t 代的适应度值, f_{average}^t 是粒子第 t 代时当前种群的平均适应度值, f_{optimal} 是种群的最优适应度值。

3.3 性能指标函数

通过改进粒子群优化算法寻找量化因子和比例因子的最优参数值时选择绝对误差积分 (ITAE) 计算粒子适应度值, 该标准是一种常用的性能评价指标, 由于考虑了误差的加权积分, 因此有助于减小系统的稳态误差, 提高系统的稳态性能^[21]。其表达式为:

$$\text{ITAE} = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \tag{11}$$

式中, $e(t)$ 是控制系统输出与期望值之间的误差函数。

3.4 改进粒子群算法寻优基本流程

- 1) 初始化粒子种群规模, 空间维数, 最大迭代次数, 惯性权重的最大值和最小值, 学习因子以及粒子的初始位置和速度;
 - 2) 根据公式 (11) 计算每个粒子的适应度值, 更新粒子个体最优值与群体最优值;
 - 3) 根据自适应惯性权重公式更新惯性权重 ω_i ;
 - 4) 根据粒子速度与位置计算公式更新粒子的速度与位置;
 - 5) 判断是否达到结束条件, 如果未达到结束条件, 返回到步骤 2);
 - 6) 得出群体最优值, 从而得到量化因子 $\alpha(e)$ 、 $\alpha(ec)$ 和比例因子 β_1 、 β_2 的最优值, 然后进行模糊 PI 控制, 得到系统的输出响应。
- 算法的执行流程如图 4 所示。

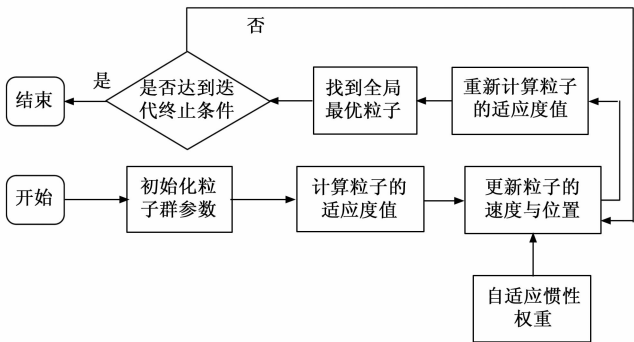


图 4 IPSO 执行流程

4 实验结果与分析

为了验证提出的改进粒子群算法模糊 PI 控制的控制效果, 在 Matlab/Simlink 中搭建了 $i_d=0$ 的 PMSM 矢量控制模型, 将改进粒子群模糊 PI 控制器、标准粒子群模糊 PI 控制器以及传统模糊 PI 控制器应用在转速环中, 进行以下仿真设计。其中电机参数与 IPSO 参数

分别如表 3 和表 4 所示。

表 3 电机参数

参数	数值	参数	数值
d 轴电感 L_d/mH	0.22	定值电阻 R/Ω	0.025
q 轴电感 L_q/mH	0.25	永磁体磁链 φ/Wb	0.068
极对数 n_p	4	输入母线电压 U_{dc}/V	200

表 4 IPSO 参数

参数	数值	参数	数值
粒子群规模	100	末端惯性权重	0.9
粒子群维数	4	学习因子 c_1, c_2	2
初始惯性权重	0.4	最大迭代次数	100

通过改进粒子群优化算法找到量化因子和比例因子的最优参数值为: $\alpha(e)=0.759$, $\alpha(ec)=1.738$, $\beta_1=7.253$, $\beta_2=3.624$ 。

根据仿真模型设置 PMSM 多工况仿真, 设定目标转速为 1 000 r/min, 仿真时间设置为 0.08 s, 进行以下两种情景的仿真研究。

- 1) 不添加任何负载启动, 目标转速 1 000 r/min, 在 0.04 s 时将目标转速变为 800 r/min。
- 2) 不添加任何负载启动, 目标转速 1 000 r/min, 在 0.04 s 时添加 10 N·m 的负载转矩。
- 3) 目标转速 1 000 r/min, 施加 12 N·m 的负载转矩, 在 0.04 s 时负载转矩突变为 0 N·m。

图 5 为工况一下电机转速变化波形图, 图 6 和图 7 分别是区域 1 和区域 2 的局部放大图, 从局部放大图可以看出使用粒子群算法的模糊 PI 控制相较于传统模糊 PI 拥有较小的超调量和更短的调节时间, 其中改进粒子群算法比标准粒子群算法的超调更小, 使得模糊 PI 控制在转速和转矩控制上得到了优化。

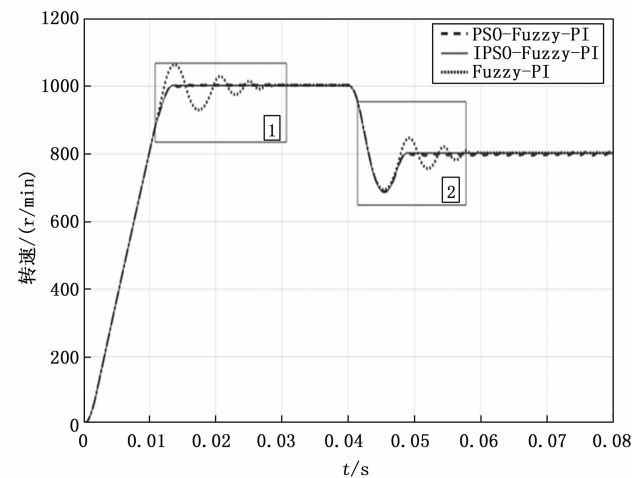


图 5 工况一下电机转速变化波形曲线

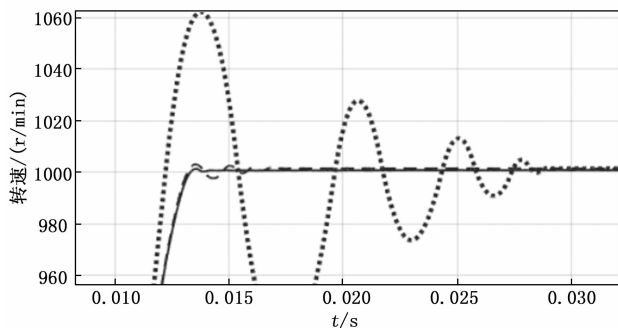


图 6 区域 1 局部放大图

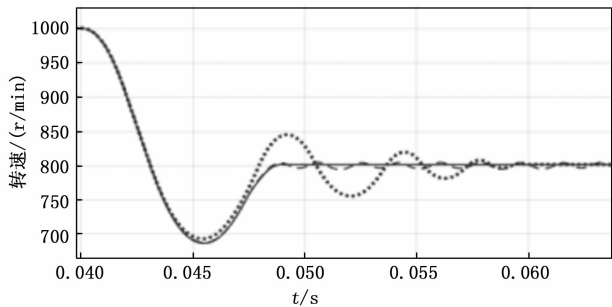


图 7 区域 2 局部放大图

图 8 为工况一下的转矩变化波形图, 图 9 和图 10 分别是区域 3 和区域 4 的局部放大图, 通过局部放大图我们清楚看到使用改进粒子群算法模糊 PI 控制方法相较于另外两种方法, 电机转矩波动明显减小, 回到稳定状态的调节时间缩短。

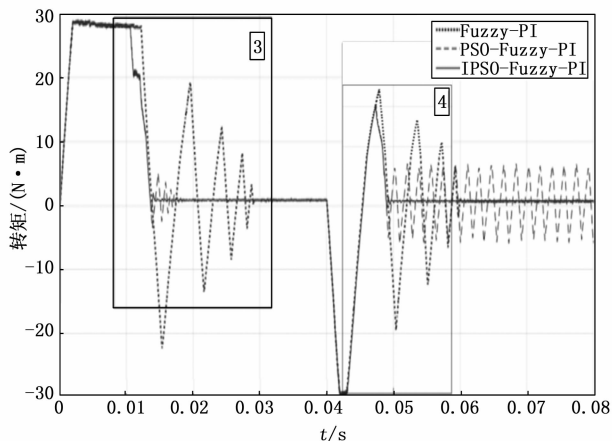


图 8 工况一下电机转矩波形曲线

图 11 是在工况二即不添加任何负载启动, 目标转速 1 000 r/min, 在 0.04 s 时添加 10 N·m 的负载转矩后电机转速变化波动曲线图, 图 12 是区域 5 的局部放大图, 由局部放大图可以看出, 添加负载的瞬间, 电机的转速略有下降, 使用改进粒子群模糊 PI 控制方法的随后迅速恢复至目标转速值, 另外两种控制方法恢复时间较长, 其中模糊 PI 控制方法下转速恢复至目标转速

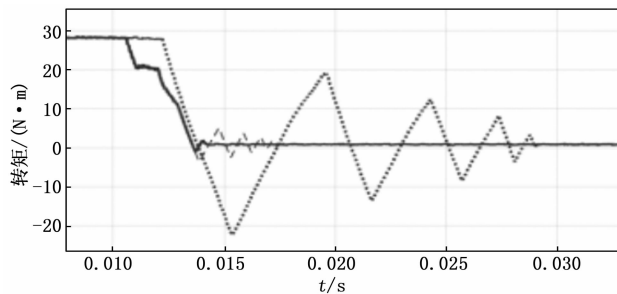


图 9 区域 3 局部放大图

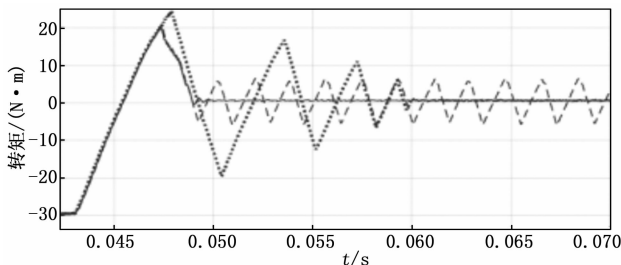


图 10 区域 4 局部放大图

值的时间最长。

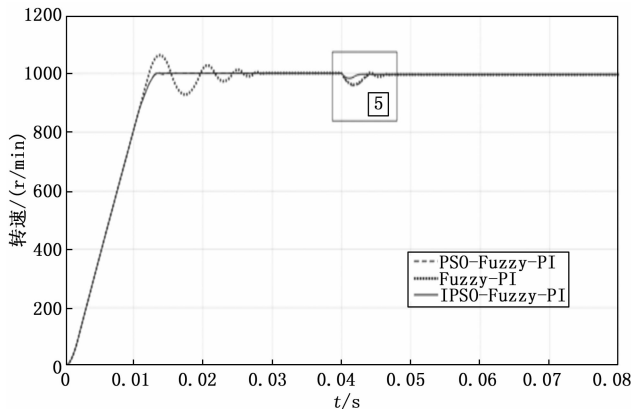


图 11 工况二下电机转速波形曲线

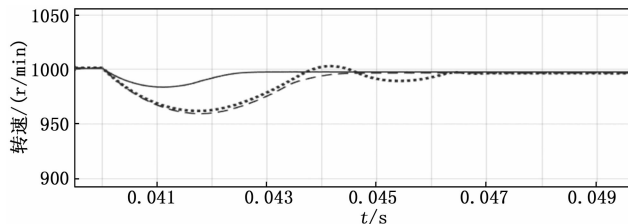


图 12 区域 5 局部放大图

图 13 是工况二下电机转矩在突加负载情况下的变化曲线图, 图 14 为区域 6 的局部放大图, 从局部放大图中可以清楚看到使用改进粒子群模糊 PI 控制方法电机转矩波动小, 超调量小, 并且恢复稳定状态时的时间快, 调节时间明显缩短。

图 15 和图 16 的局部放大图 (区域 7 和区域 9) 是工况三下, 以 12 N·m 的负载启动, 使用改进粒子群

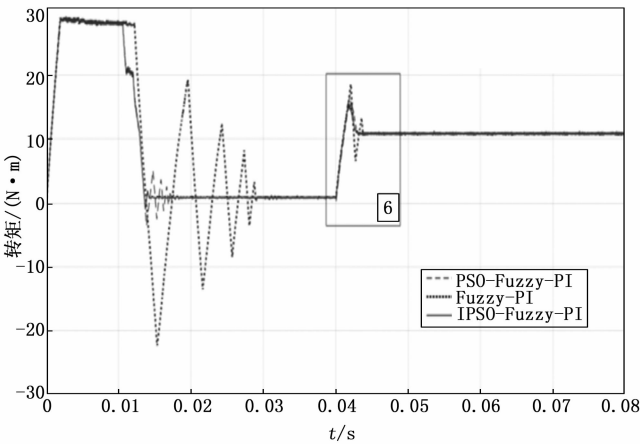


图 13 工况二下电机转矩波形曲线

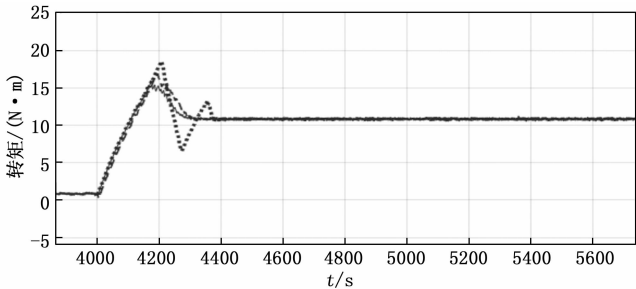


图 14 区域 6 局部放大图

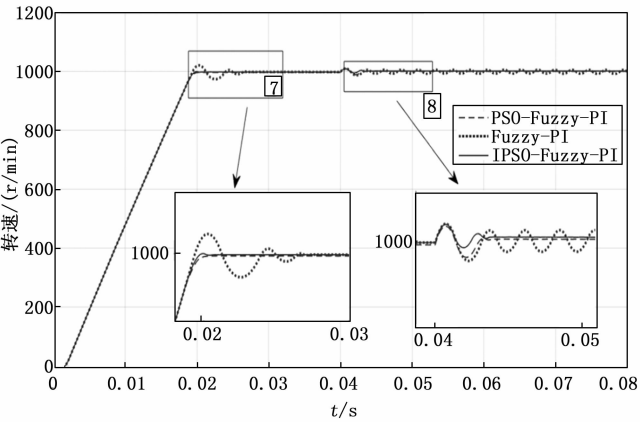


图 15 工况三下电机转速波形曲线

模糊 PI 控制方法相比于传统模糊 PI 控制和标准粒子群模糊 PI 控制转速和转矩平稳达到目标值并且无明显超调, 控制效果良好。

在 0.04 s 时负载突变为 0 N·m (区域 8), 转速有较小的波动, 图 15 和图 16 的局部放大图 (区域 8 和区域 10) 可以看出转速和电磁转矩在改进粒子群模糊 PI 控制方式下能够更快的恢复到目标值。

通过对上述 3 种工况下 PMSM 转速和转矩变化情况, 计算出调节时间、超调量和稳态误差 3 个性能指标比较 3 种控制方法的控制效果, 结果如表 5、表 6

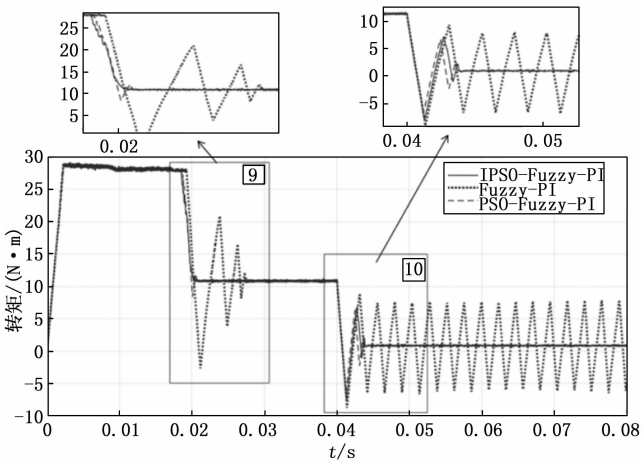


图 16 工况三下电机转矩波形曲线

和表 7 所示。

表 5 工况一下 3 种控制方法对比结果

工况一	调节时间/s	超调量/%	稳态误差/(r/min)
模糊 PI 控制	28.6×10^{-3}	6.008 3	60.467 3
PSO 模糊 PI 控制	15.9×10^{-3}	0.302 8	12.341 3
IPSO 模糊 PI 控制	13.7×10^{-3}	0.069 9	10.792 7

表 6 工况二下 3 种控制方法对比结果

工况二	调节时间/s	超调量/%	稳态误差/(r/min)
模糊 PI 控制	65.6×10^{-3}	4.060 6	3.645 4
PSO 模糊 PI 控制	43.5×10^{-3}	3.814 1	3.315 9
IPSO 模糊 PI 控制	26.1×10^{-3}	1.627 2	2.414 6

表 7 工况三下 3 种控制方法对比结果

工况三	调节时间/s	超调量/%	稳态误差/(r/min)
模糊 PI 控制	35.2×10^{-3}	3.914 5	7.207 4
PSO 模糊 PI 控制	20.8×10^{-3}	1.725 4	2.194 6
IPSO 模糊 PI 控制	18.4×10^{-3}	0.253 8	1.247 5

根据表 5~7 可知, 基于改进粒子群算法寻优的模糊 PI 控制方法与传统模糊 PI 控制和标准粒子群模糊 PI 控制相比, 第一种工况下其调节时间、超调量、稳态误差降幅分别为 52.1%, 98.9%, 82.2% 和 13.9%, 76.9%, 12.5%, 第二种工况下, 其调节时间、超调量、稳态误差降幅分别为 60.4%, 59.9%, 33.8% 和 40.2%, 57.3%, 27.2%, 第三种工况下, 其调节时间、超调量、稳态误差降幅分别为 47.7%, 93.5%, 82.7% 和 11.6%, 85.3%, 43.2%, 因此基于改进粒子群算法寻优的模糊 PI 控制方法相比另外两种控制方法在转速和电磁转矩的超调量、调节时间、稳态误差等方面表现更为优越, 能够有效地抑制转速和电磁转矩的

超调和波动,并且缩短调节时间,提高了系统的动态响应能力和控制效果。

5 结束语

永磁同步电机(PMSM)由于其固有的复杂性和高度耦合的非线性特征,使得传统的比例-积分(PI)控制难以充分满足系统对动态响应能力和控制性能的需求。尽管模糊控制作为一种控制策略在优化方面具有一定的潜力,但单独应用模糊控制在实际效果上往往不够显著,无法达到理想的性能改进。因此,本文在模糊控制的基础上融合粒子群算法,提出引入 Arctan 函数调整惯性权重的方式,有效避免粒子陷入局部最优解,并在电机转速环上进行测试,结果表明,在该算法下,系统能够快速达到稳定状态并超调量较小,使系统具有更好的动态响应能力和控制效果。

参考文献:

- [1] 王震,刘洋,洪毅,等.基于固定时间终端滑模的永磁同步电机控制[J].扬州大学学报(自然科学版),2024,27(2):15-20.
- [2] 黎西,袁锐波,季传坤,等.滑模控制的PMSM调速系统抗负载性能研究[J].重庆理工大学学报(自然科学),2020,34(7):142-148.
- [3] 支金泽,安颖,高帅.基于模糊PI的CVT用电动油泵控制研究[J].机床与液压,2024,52(1):59-65.
- [4] LI H, SONG B, CHEN T, et al. Adaptive fuzzy PI controller for permanent magnet synchronous motor drive based on predictive functional control[J]. Journal of the Franklin Institute, 2021, 358(15): 7333-7364.
- [5] 刘春喜,朱双蕊,崔正.果蝇优化模糊PI控制 CLLC 谐振变换器[J].制造业自动化,2022,44(5):108-110.
- [6] QU B, QI J. Research on speed control algorithm of stepper motor with fuzzy PID optimization based on genetic algorithm[C]//2023 IEEE the 11th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC). Chongqing, IEEE Press, 2023: 682-686.
- [7] 李珊珊,易文俊,管军,等.基于遗传算法的电动舵机系统模糊PID控制[J].兵器装备工程学报,2021,42(3):162-167.
- [8] SHOURAN M, ALSSEID A. Particle swarm optimization algorithm-tuned fuzzy cascade fractional order pi-fractional order PD for frequency regulation of dual-area power system[J]. Processes, 2022, 10(3): 477-477.
- [9] DONG Y, LI C, LIU L, et al. A fuzzy PI controller for piezoelectric fast mirror based on particle swarm optimization[C]//2021 IEEE the 16th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). IEEE Press, Chengdu, 2021: 1751-1756.
- [10] 刘建华.粒子群优化算法的基本理论及其改进研究[D].长沙:中南大学,2009.
- [11] 王东风,孟丽,赵文杰.基于自适应搜索中心的骨干粒子群优化算法[J].计算机学报,2016,39(12):2652-2667.
- [12] LIU Z, NIE J, WEI H, et al. Switched PI control based MRAS for sensorless control of PMSM drives using fuzzy logic-controller[J]. IEEE Open Journal of Power Electronics, 2022, 3: 368-381.
- [13] WANG Z, YU A, LI X, et al. A novel current predictive control based on fuzzy algorithm for PMSM[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2019, 7(2): 990-1001.
- [14] CHOI H H, YUN. Implementation of evolutionary fuzzy PID speed controller for PM synchronous motor[J]. IEEE Trans on Industrial Informatics, 2015, 11(2): 540-547.
- [15] KHALED E, MUHAMMAD S A, RIZWAN U. Dynamic stability enhancement using fuzzy PID control technology for power system[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2019, 17: 234-242.
- [16] SONG B, XIAO Y, XU L. Design of fuzzy PI controller for brushless DC motor based on PSO-GSA algorithm[J]. Systems Science and Control Engineering, 2020, 8(1): 67-77.
- [17] TRINH L M, VO V A, BUI T T. A fuzzy-PID controller combined with PSO algorithm for the resistance furnace[J]. Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal, 2020, 5: 568-575.
- [18] 龚仁喜,杨元甲,王保平.改进粒子群优化的双向DC/DC变换器模糊PI控制[J].河南科技大学学报(自然科学版),2022,43(6):37-43.
- [19] 赵凯,曾涛.基于改进粒子群算法的移相全桥模糊PID控制[J].厦门大学学报(自然科学版),2024,63(2):259-270.
- [20] 成旭明,段杰,肖息,等.粒子群优化的变论域模糊PI机电作动器控制[J].机械与电子,2022,40(1):42-47.
- [21] 宋百玲,董刘伟,胡思远,等.粒子群优化变论域模糊PID的永磁同步电机矢量控制策略[J].重庆理工大学学报(自然科学),2024,38(3):64-73.