

# 基于 GPIO 的永磁同步电机模型预测转矩控制

周立<sup>1</sup>, 李京明<sup>1</sup>, 周越鹏<sup>2</sup>, 尚治博<sup>1</sup>

(1. 辽宁工程技术大学电气与控制工程学院, 辽宁 葫芦岛 125105; 2. 山西阳光发电有限责任公司, 山西 阳泉 045200)

**摘要:** 在永磁同步电机模型预测转矩控制(model predictive torque control, MPTC)中, 由于目标函数控制变量的量纲不同, 为了在代价函数中选取最优的权重系数, 提出一种改进高斯变异鸽群算法(Gaussian mutation pigeon-inspired optimization algorithm, GPIO)实现权重系数自整定。首先, 基于代价函数最小化原则设计 PIO 的目标函数, 用电流  $i_d$ 、 $i_q$  脉动误差均方根评价权重系数。其次, 在传统高斯变异算子的基础上引入自适应调整动态参数实现变异。仿真和实验结果表明, 将改进后的算法应用于永磁同步电机模型预测转矩系统, 能在较少的迭代次数内整定出最优的权重系数, 极大地降低了转矩误差和电流谐波畸变率。

**关键词:** 模型预测转矩控制; 代价函数; 权重系数; 高斯变异鸽群算法; 高斯变异算子

## Model predictive torque control of permanent magnet synchronous motor based on GPIO

ZHOU Li<sup>1</sup>, LI Jingming<sup>1</sup>, ZHOU Yuepeng<sup>2</sup>, SHANG Zhibo<sup>1</sup>

(1. Faculty of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China;

2. Shanxi Yangguang Power Generation Responsibility Company, Yangquan 045200, China)

**Abstract:** In the model predictive torque control (MPTC) of permanent magnet synchronous motor (PMSM), due to the different dimensions of control variables in the objective function, in order to select the optimal weight coefficient in the cost function, an improved Gaussian mutation pigeon-inspired optimization algorithm (GPIO) is proposed to realize the self-tuning of the weight coefficient. First, the objective function of PIO is designed based on the principle of cost function minimization, and the weight coefficient is evaluated by the root mean square of current  $i_d$  and  $i_q$  pulse error. Second, based on the traditional Gaussian mutation operator, adaptive dynamic parameters are introduced to realize mutation. The simulation and experimental results show that the improved algorithm is applied to the model predictive torque system of permanent magnet synchronous motor, and the optimal weight coefficient can be set within less iterations, it reduces the torque error and current harmonic distortion rate.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51177067).

**Key words:** model predictive torque control; cost function; weight coefficient; Gaussian mutation pigeon-inspired optimization algorithm; Gaussian mutation operator

## 0 引言

永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)由于省去了励磁装置, 结构更加简单, 体积小、功率因数高、惯性小, 具有非线性、强耦合、动态响应快的特点, 更加便于控制<sup>[1-6]</sup>。传统的矢量控制(field orientation control, FOC)的核心算法是空间矢量调制, 利用 PI 调节器对定子电流的励磁分量、转矩分量进行控制, 达到控制转矩的目

的<sup>[7-10]</sup>。直接转矩控制(direct torque control, DTC)以转矩和磁链作为控制目标, 减小了计算量, 提高了动态响应能力。但转矩、磁链脉动大、且开关频率高、开关损耗大<sup>[11-14]</sup>。

PMSM 模型预测转矩控制(model predictive torque control, MPTC)是将定子磁链幅值和电磁转矩作为控制目标, 应用于 PMSM 中, 一个最优的权重系数对整个控制系统的性能具有重要的影响<sup>[15-20]</sup>。学者对优化权重系数设计了大量的优化算法。文献[21]根据无差拍直接转矩磁链控制思想, 将转矩和磁链转化为相同量纲的电压矢量, 但是在转换过程

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51177067)

中, 却极大地降低了转换精度。文献[22]采用将混沌变异理论与 PSO 相结合的算法, 将新的混沌序列对所选择的子粒子群进行替换, 通过这一方法实现粒子的混沌变异。但全局与局部搜索的不协调问题尚未解决。鸽群算法(pigeon inspired optimization, PIO)是文献[23]中提出的一种智能仿生优化算法。PIO 算法由于操作简单、计算效率高、参数少等优点, 已成为当前智能仿生算法研究的新热点<sup>[24-27]</sup>。

本文基于鸽群算法提出一种高斯变异鸽群算法, 在原有鸽子基础上, 通过增加一个服从高斯分布的随机扰动项实现变异。在模型预测转矩控制中采用 GPIO 整定权重系数对多目标进行优化, 从而实现快速高效的跟踪。最后经过仿真实验, 证明了将该算法应用于 PMSM 系统可以有效改善转矩脉动、降低电流谐波畸变率(total harmonic distortion, THD), 极大地改善了电机的运行性能。

## 1 PMSM 数学模型

表贴式 PMSM 相比于其他交流电机具有功率因数高、体积小、惯性小和结构简单等优势。假设表贴式 PMSM 不考虑铁芯饱和以及磁滞、涡流损耗, 感应电动势波形为正弦波, 永磁体无阻尼作用。PMSM 经三相静止-两相旋转后, 表贴式 PMSM 的定子电压方程为

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega_e \psi_q \\ u_q = R_s i_q + \frac{d\psi_q}{dt} - \omega_e \psi_d \end{cases} \quad (1)$$

定子的磁链方程为

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \psi_f \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (2)$$

电磁转矩方程为

$$T_e = \frac{3}{2} P_n \psi_f i_q \quad (3)$$

式中:  $u_d$ 、 $u_q$  为 dq 轴电压;  $\psi_d$ 、 $\psi_q$  为 dq 轴磁链;  $i_d$ 、 $i_q$  为 dq 轴电流;  $L_d$ 、 $L_q$  为 dq 轴电感;  $\omega_e$  为电角速度;  $\psi_f$  为永磁体磁链;  $P_n$  为极对数。

## 2 模型预测转矩控制

### 2.1 基本原理

图 1 为 MPTC 策略原理图。通过采样电路得出三相定子电流瞬时值  $i_a^k$ 、 $i_b^k$  和  $i_c^k$ , 将其在 Clark/Park 模块中进行变换, 输出旋转坐标系下的励磁电流瞬时值  $i_d^k$ 、转矩电流  $i_q^k$ 。电磁转矩参考值  $T_e^*$  由 PI 控

制器获得。将以上变量经转矩预测模型计算, 得出电磁转矩预测值  $T_e^{k+1}$ 、磁链预测值  $\psi_w^{k+1}$ , 将所得出的预测值传递至代价函数中, 计算后将误差最小的开关矢量输入到两电平逆变器(2L-VSI), 作用于永磁同步电机系统。

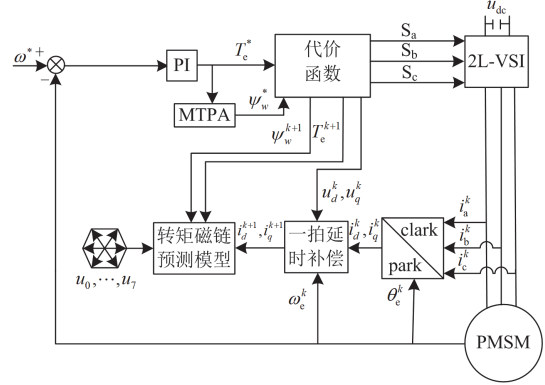


图 1 MPTC 策略控制原理图

Fig. 1 MPTC control principle diagram

### 2.2 给定转矩、磁链参考值

转矩的给定值由速度外环 PI 调节器计算得出, 参考磁链  $\psi_w^*$  基于最大转矩电流比(maximum torque per ampere, MTPA)式(4)计算得到。

$$\psi_w^* = \sqrt{\psi_f^2 + \left(\frac{L_q T_e^*}{1.5 P_n \psi_f}\right)^2} \quad (4)$$

### 2.3 电流、转矩和磁链预测

根据 PMSM 的数学模型, 将式(2)代入式(1)中, 定子电压方程可表示为

$$\begin{cases} u_d = L_d \frac{di_d}{dt} + R_s i_d - \omega_e L_q i_q \\ u_q = L_q \frac{di_q}{dt} + R_s i_q + \omega_e L_d i_d + \omega_e \psi_f \end{cases} \quad (5)$$

在实际控制系统中, 一拍延时会影响控制精度。通过一拍延时补偿可以降低延时的负面影响。为了实现下一时刻电流的预测, 首先采用一阶欧拉法将电压方程式(5)离散化, 则电流预测方程表示为

$$\begin{cases} i_d^{k+1} = \left(1 - \frac{R_s T_s}{L_d}\right) i_d^k + \frac{T_s}{L_d} (u_d^k + \omega_e^k L_q i_q^k) \\ i_q^{k+1} = \left(1 - \frac{R_s T_s}{L_q}\right) i_q^k + \frac{T_s}{L_q} [u_q^k + \omega_e^k (L_d i_d^k + \psi_f)] \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $T_s$  为采样周期;  $u_d^k$ 、 $u_q^k$  第  $k$  次预测时 dq 轴电压值;  $\omega_e^k$  第  $k$  次预测时的电角速度。

由于一阶欧拉积分公式精度较低, 往往采用二阶欧拉积分公式, 离散后的电流预测方程为

$$i_p^{k+1} = \begin{cases} i_d^{k+1} + \frac{T_s R_s}{2L_s} (i_d^{k+1} - i_d^k) \\ i_q^{k+1} + \frac{T_s R_s}{2L_s} (i_q^{k+1} - i_q^k) \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $i_p^{k+1}$  为二阶欧拉法离散后  $dq$  轴电流预测值。

根据式(2), 磁链预测方程可以表示为

$$\begin{cases} \psi_d^{k+1} = L_d i_d^{k+1} + \psi_f \\ \psi_q^{k+1} = L_q i_q^{k+1} \\ \psi_w^{k+1} = \sqrt{(\psi_d^{k+1})^2 + (\psi_q^{k+1})^2} \end{cases} \quad (8)$$

根据式(2)和式(3)可以获得转矩预测方程为

$$T_e^{k+1} = \frac{3}{2} P_n \psi_f i_q^{k+1} \quad (9)$$

## 2.5 基于代价函数最小化的最优设计

MPTC 的控制目标是转矩和磁链的脉动误差。

由于两变量的量纲和幅值范围都不同, 因此需要设计适当的加权因子以平衡两控制变量之间的关系。

代价函数可以设计为

$$g = (T_e^* - T_e^{k+1})^2 + \lambda \cdot (\psi_w^* - \psi_w^{k+1})^2 \quad (10)$$

为保证电机控制系统的电磁转矩、定子磁链具有较好的跟踪性能, 分析电流误差影响, 将代价函数改写为

$$g = (\Delta T_e)^2 + \lambda (\Delta \psi_w)^2 = \left[ \left( \frac{3}{2} P_n \psi_f \right)^2 + \lambda L_q^2 \right] (\Delta i_q)^2 + \lambda L_d^2 \cdot (\Delta i_d)^2 + 2\lambda L_d \psi_f \Delta i_d + \lambda \psi_f^2 \quad (11)$$

为了更准确地计算权重系数, 从式(11)可以得出, 将  $i_d$ 、 $i_q$  的脉动均方根作为评价依据具有更好的效果。

## 3 基于 PIO 的权重系数自整定

### 3.1 PIO 目标函数

基于文献[19]采用电流脉动均方根确定鸽群算法。因此目标函数设计为

$$f = x + y + |y| \quad (12)$$

式中:

$$x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (i_d - i_d^*)^2}{n}} + Q \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (i_q - i_q^*)^2}{n}};$$

$$y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (i_q - i_q^*)^2}{n}} - \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (i_d - i_d^*)^2}{n}}。$$

式中:  $i_d^*$ 、 $i_q^*$  分别为  $dq$  轴的电流参考值;  $Q$  为电流  $i_q$  误差控制权重系数。函数中引入  $y+|y|$  项, 则  $\Delta i_q \leq \Delta i_d$ , 不仅使电流 THD 尽可能减小, 而且转矩误差也得到改善。

### 3.2 PIO 原理

鸽子具有特殊的归巢行为, 鸽子最初使用地图罗盘算子, 由鸽子的位置矢量和速度矢量构成, 鸽子即为寻优结果。当鸽子接近目的地时, 它们开始使用地标算子, 淘汰迷失鸽群, 通过地标算子的优质鸽群更精确地到达目的地。

#### 3.2.1 地图模型

在地图罗盘算子中, 鸽子巢穴的位置是全局最优解。通过计算鸽子的位置得到目标函数值。鸽子的位置和速度由  $X$  和  $V$  表示, 经过  $k$  次迭代后, 第  $i$  个鸽子的速度和位置为

$$\begin{cases} V_i^{(k)} = V_i^{(k-1)} \cdot e^{-Rk} + R_{\text{rand}} (X_{\text{best}} - X_i^{(k-1)}) \\ X_i^{(k)} = X_i^{(k-1)} + V_i^{(k)} \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $k$  为目前鸽子的迭代次数;  $R$  为取值 0~1 之间的地图罗盘因子;  $X_{\text{best}}$  为该迭代次数的全局最优解;  $R_{\text{rand}}$  是取值 0~1 之间的随机值。种群中的鸽子个体根据式(13)调整其速度方向。

#### 3.2.2 地标模型

在地标算子阶段, 为了提高计算的效率, 提高群体的优质性, 将劣质群体淘汰一半。将优质鸽群中种鸽所处的位置作为剩余鸽子的归巢方向, 更新鸽子的位置。

$$N^{(k)} = \frac{N^{(k-1)}}{2} \quad (14)$$

$$X_c^{(k)} = \frac{\sum_{i=1}^{N^{(k)}} X_i^{(k)} \cdot \text{fitness}(X_i^{(k)})}{N^{(k-1)} \sum_{i=1}^{N^{(k-1)}} \text{fitness}(X_i^{(k)})} \quad (15)$$

$$X_i^{(k)} = X_i^{(k-1)} + R_{\text{rand}} \cdot (X_c^{(k)} - X_i^{(k-1)}) \quad (16)$$

式中:  $N^{(k)}$  为第  $k$  次迭代鸽子的数量;  $X_c^{(k)}$  为  $k$  次迭代后剩余鸽子的归巢方向,  $c$  表示优质鸽群中种鸽所处的位置;  $\text{fitness}(X_i)$  为第  $i$  只鸽子的适应度函数值, 由优化目标函数构造而成。最小值优化问题可以选择函数为

$$\text{fitness}(X_i^{(k)}) = \text{fitness}_{\min}(X_1^{(k)}, X_2^{(k)}, \dots, X_N^{(k)}) (i \in (1, N)) \quad (17)$$

### 3.3 改进高斯变异鸽群算法

#### 3.3.1 多样性

由于鸽群中的个体并非完全相同, 所以种群具

有多多样性。种群多样性主要分为个体多样性和群体多样性。每一次迭代的个体多样性计算公式为

$$D_{p,k} \Big|_{\substack{p=1,2,\dots,s \\ k=1,2,\dots,K}} = \sum_{j=1}^D (X_{i,j}^{(k)} - \bar{X}_j^{(k)})^2 \quad (18)$$

$$\bar{X}_j^{(k)} = \frac{1}{s} \sum_{j=1}^s X_{i,j}^{(k)} \quad (19)$$

式中： $D_{p,k}$ 为个体多样性； $s$ 为种群规模； $k$ 为迭代次数； $D$ 为种群多样性阈值。

每一次迭代的种群多样性计算如下：

$$D_{s,k} \Big|_{\substack{p=1,2,\dots,s \\ k=1,2,\dots,K}} = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s \left[ \sum_{j=1}^D (X_{i,j}^{(k)} - \bar{X}_j^{(k)})^2 \right] \quad (20)$$

式中， $D_{s,k}$ 为种群多样性。

### 3.3.2 高斯变异算子

在PIO算法的前期搜索过程中，由于种群多样性的下降会造成该算法精确度降低，探索阶段早熟收敛。本文选择使用高斯变异算子改进PIO。高斯变异算子通过在原有鸽子个体基础上，另加一个服从高斯分布的随机扰动项实现变异。当种群多样性阈值 $D$ 低于某一最小阈值 $D_{low}$ 时，激活变异算子，实现变异。为了提高高斯变异的收敛性并保证精度，对传统的高斯变异算子引入自适应调整动态参数 $\omega$ 、 $c$ 。

如果 $D < D_{low} = 2$ ，则

$$X_{i,j}^{(k)} = \omega \cdot X_{i,j}^{(k-1)} + c \cdot X_{i,j}^{(k-1)} \text{Gauss}(0,1) \quad (21)$$

式中： $\omega = 1 - k^2 / k_{max}^2$ ，其中 $k_{max}$ 为最大迭代次数； $c = k^2 / k_{max}^2$ ；Gauss(0,1)为满足高斯分布的随机扰动量。 $\omega$ 、 $c$ 的变化曲线如图2所示，在算法寻优过程中， $\omega$ 随迭代次数的增加而减少， $c$ 随 $\omega$ 的减少而逐渐增大，保证了最优值周围的寻优精度。两者相互配合，协调了局部和全局寻优的能力。

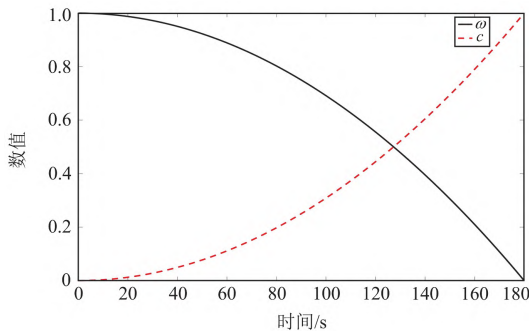


图2  $\omega$ 、 $c$ 的变化曲线

Fig. 2 Change curve of  $\omega$  and  $c$

### 3.3.3 全局最优的判断

GPIO完成迭代后都会得到全局最优，将迭代后的全局最优值与之前的适应度最优值作差，若两

者的差值不大于之前适应度最优值的5%，则全局最优值概率增加；否则，将迭代后的全局最优值赋值于之前的适应度最优值，重置概率，继续循环该算法。当概率满足定制值 $P_{max}$ 时，认为该全局最优值最为精确。然而，为了保证全局最优， $P_{max}$ 设置不宜过低， $P_{max}$ 设置太高会导致算法周期过长，此处 $P_{max}$ 设置为2。

### 3.4 GPIO与MPTC的结合

在永磁同步电机MPTC中，目标函数由电机 $i_d$ 、 $i_q$ 误差均方根组合构成，第 $i$ 只鸽子的当前位置 $X_i^k$ 为当前迭代次数下的 $i_d$ 、 $i_q$ 值；将第 $i$ 只鸽子下一次迭代的速度 $V_i^{(k+1)}$ 看作当前迭代次数下 $i_d$ 、 $i_q$ 的增加量；第 $i$ 只鸽子的适应度 $\text{fitness}(X_i)$ 为优化目标函数值；鸽子在地图罗盘因子阶段的最优位置 $X_{best}$ 为最优权重系数附近的权重系数；地标算子阶段的 $X_c^{(k)}$ 为最优权重系数。通过权重系数自整定，避免了传统的将转矩、磁链转换成同一量纲带来的转换误差，将改进高斯变异鸽群算法应用于求解模型预测转矩控制系统中的权重系数，可极大提高求解的精度。

## 4 仿真、实验分析

### 4.1 仿真系统及其参数设置

为了验证本文所提的鸽群算法，通过Matlab仿真软件及Simulink搭建永磁同步电机模型预测转矩控制的仿真模型，为了充分验证该算法的有效性，此次仿真采用传统粒子群算法(PSO)、传统鸽群算法(PIO)和高斯变异鸽群算法(GPIO)分别对模型预测转矩控制中的权重系数进行整定，通过对比PSO、PIO和GPIO3种仿生算法，验证了GPIO算法的准确性和适用性。仿真和实验的电机参数设置如表1所示，各算法参数设置如表2所示，系统采样频率为20 kHz。

目标函数中不同的电流误差控制系数 $Q$ 影响转矩电流 $i_q$ 和励磁电流 $i_d$ 的控制比重，进而对代价函数中权重系数 $\lambda$ 的寻优产生不同影响。本次仿真中选取 $Q=1$ 、 $Q=1.5$ 、 $Q=2$ 分别进行仿真，并对结果进行比较分析。使用2s内的电流误差作为采样点，计算电流误差均方根，然后计算鸽子个体的目标函数值，整定权重系数。在电机转速为500 r/min，负载为10 N·m的工况下，当 $Q=1$ 、 $Q=1.5$ 、 $Q=2$ 时，进行仿真试验，图3为各算法仿真输出的目标函数值，图4为各算法仿真输出的权重系数值。

由以上仿真结果可知，对于不同的电流误差控制系数 $Q$ ，3种仿生算法均能在较少的迭代次数内

求取最优的权重系数, 传统的粒子群和鸽群算法求解权重系数时, 目标函数值相对较大, 说明在电机控制系统中具有较大的电流误差。相比于 PSO 以及 PIO, GPIO 得出的权重系数使得目标函数值更小, 搜索精度也相对更高。

表 1 仿真和实验的电机参数

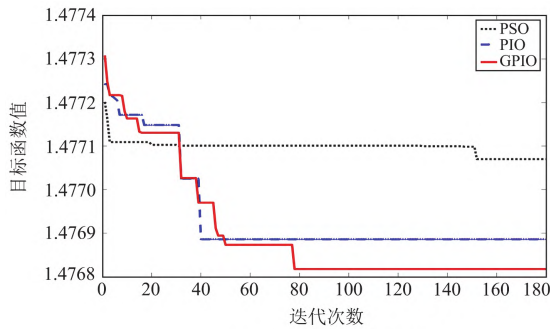
Table 1 Motor parameter for simulation and experiment

序号	参数	数值
1	直流母线电压 $U_{dc}/V$	560
2	额定转速 $n_N/(r/min)$	1000
3	极对数 $P$	3
4	相电阻 $R_s/\Omega$	3.678
5	$dq$ 轴电感 $L_d、L_q/mH$	0.0085,0.0085
6	转子磁链 $\psi_f/Wb$	0.803
7	转动惯量 $J/(kg \cdot m^2)$	0.001 148

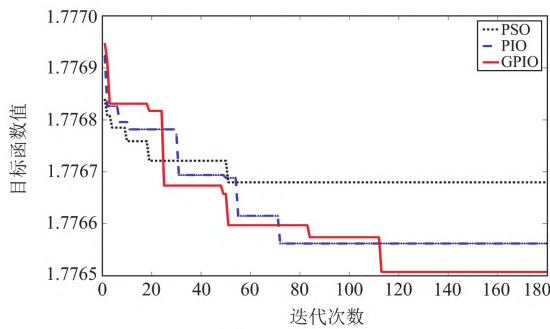
表 2 各算法参数

Table 2 Parameters of the algorithms

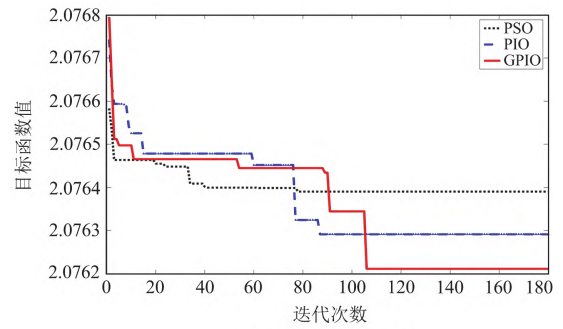
序号	参数	PSO	PIO	GPIO
1	迭代次数 $K_{c1max}$	—	120	120
2	迭代次数 $K_{c2max}$	180	60	60
3	惯性权重	0.4	—	—
4	种群数 $N$	6	10	10
5	学习因子 $C_1$	1.2	—	—
6	学习因子 $C_2$	1.6	—	—
7	地图罗盘因数 $R$	—	0.3	0.3
8	寻优范围	[0,100]	[0,100]	[0,100]



(a)  $Q=1$  时目标函数值



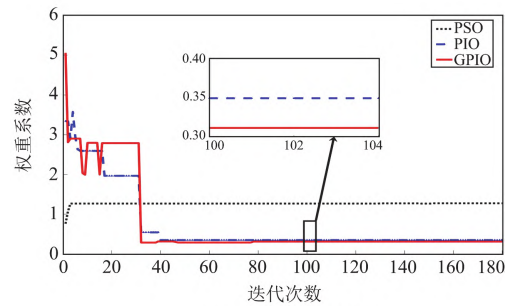
(b)  $Q=1.5$  时目标函数值



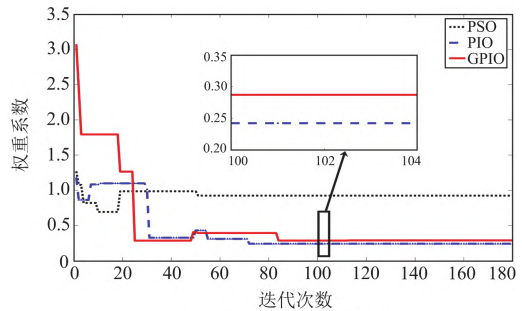
(c)  $Q=2$  时目标函数值

图 3 各算法输出目标函数值

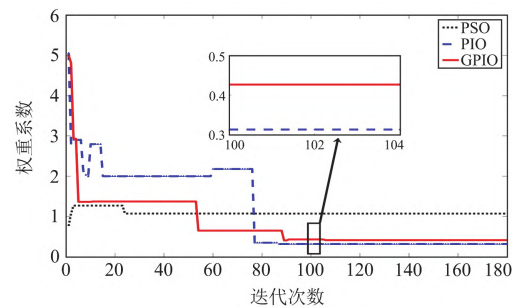
Fig. 3 Output value of objective function of the algorithms



(a)  $Q=1$  时权重系数值



(b)  $Q=1.5$  时权重系数值



(c)  $Q=2$  时权重系数值

图 4 各算法输出权重系数值

Fig. 4 Output weight coefficients of the algorithms

为了进一步验证所提方法在电机控制系统中良好的优势, 将表 3 中  $Q=2$  所得出的权重系数值应用于电机控制系统。

表 3  $Q = 2$  时的权重系数整定值

Table 3 Setting value of weight coefficients when  $Q = 2$

序号	算法	权重系数 $\lambda$	THD/%
1	PSO	1.0684	4.96
2	PIO	0.2422	4.5
3	GPIO	0.4087	3.71

在电机初始转速为 500 r/min, 1 s 时施加 10 N·m 负载的工况下, 对模型预测转矩控制系统下输出的三相电流  $i_a$  波形和转矩  $T_e$  进行分析。根据图 5、图 6 可知, 3 种方法均能输出良好的电流波形。通过对谐波畸变率进行分析, 相比于传统的 PSO、PIO, 所提改进算法输出的三相电流波形最为平滑, 谐波畸变率从 4.96% 减少至 3.71%。

根据图 7 可知, 基于 PSO 的模型预测转矩控制系统输出的转矩波动最大, 电机的噪声最大, 电机运行的稳定性降低。基于 GPIO 的模型预测转矩控制系统输出的转矩得到了极大的改善, 所提方法与

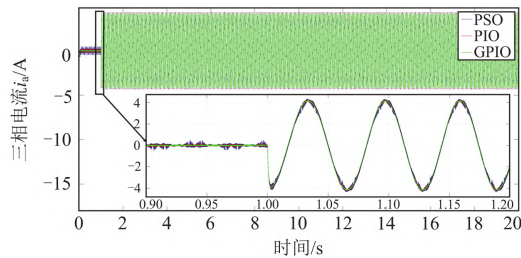
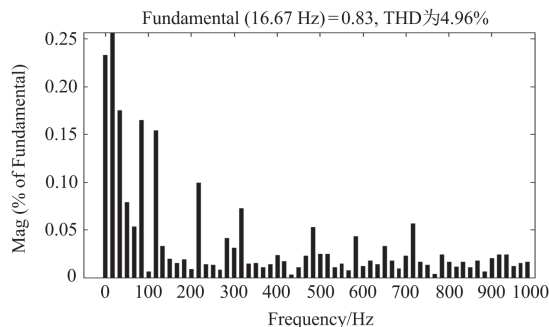
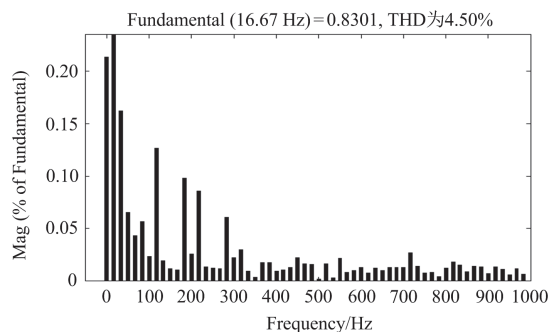


图 5 三相电流  $i_a$  波形图

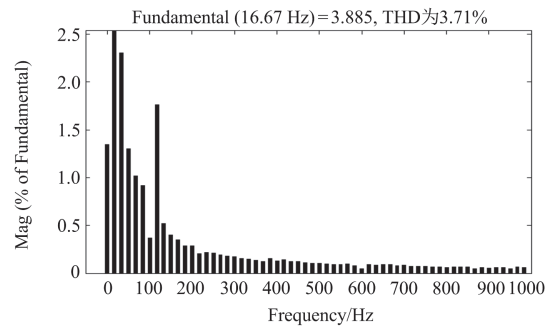
Fig. 5 Three-phase current  $i_a$  waveform diagram



(a)  $\lambda = 1.0684$  的电流谐波畸变率



(b)  $\lambda = 0.2422$  的电流谐波畸变率



(c)  $\lambda = 0.4087$  的电流谐波畸变率

图 6 各权重系数值  $\lambda$  下的电流谐波畸变率

Fig. 6 Value of THD under each weight coefficient  $\lambda$

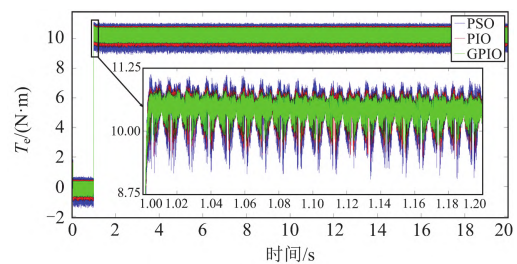


图 7 输出转矩波形图

Fig. 7 Output torque waveform diagram

传统的方法相比, 波动幅值降低, 控制精度提高。GPIO 在求解电机多输入多输出优化问题上具有良好的实用价值。

#### 4.2 实验分析

本文中结合 Matlab 和 DSP 实验平台对该算法的可行性进行验证。电机实验平台如图 8 所示, 以三相永磁同步电动机、磁粉制动器、示波器、上位机以及由控制板、模型板、功率板构成的驱动控制器为基础, 搭建了基于 TMS320F28335 芯片的实验平台。首先通过 Matlab/Simulink 搭建基于 PSO、PIO、GPIO 3 种算法的永磁同步电机模型预测转矩控制的仿真模型, 其次利用 CCS6.2 代码编译, 将其输入驱动控制器, 调整参数获得不同运行工况下的数据, 利用上位机进行数据采集。

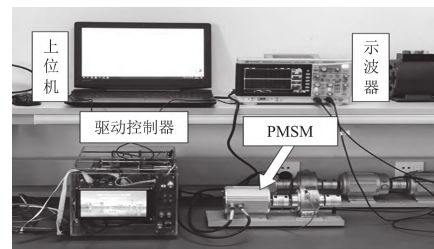


图 8 电机实验台架

Fig. 8 Motor test bench

电流  $i_q$  误差控制权重系数  $Q$  取为 2, 由仿真图可知, 迭代次数在 40~90 次内权重系数均会收敛, 为了减少计算量, 将迭代次数限制在 90 次, 采用 2 s 内的电流误差作为采样点。PSO、PIO、GPIO 整定的权重系数  $\lambda$  分别为 1.017、0.3135、0.4062, 在转速为 500 r/min, 负载为 10 N·m 的工况下实验结果如图 9 所示。

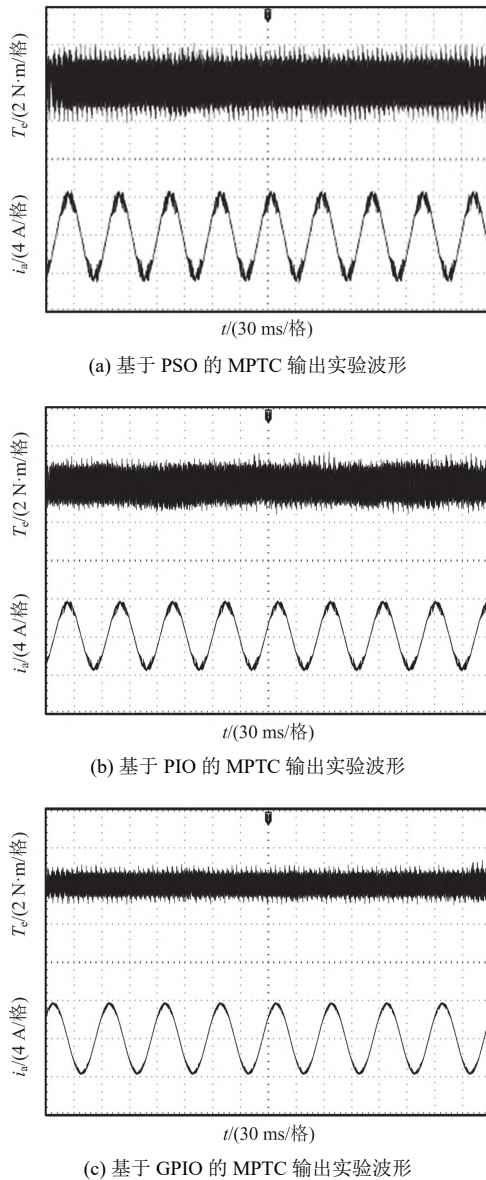


图 9 基于各算法的 MPTC 输出实验波形  
(500 r/min, 10 N·m 负载工况)

Fig. 9 Output experimental waveform of MPTC based on each algorithm (500 r/min, 10 N·m load condition)

通过实验结果对比可知, 改进 GPIO 方案的转矩脉动幅值为 1.83 N·m, 传统 PSO 和 PIO 方案的转矩脉动幅值分别为 4.01 N·m、3.32 N·m, 改进方

案将转矩脉动幅值分别降低了 54.36%、44.88%, 具有良好的降低转矩脉动效果。通过输出电流的对比, 改进 GPIO 方案的谐波缺陷大大降低, 输出的电流质量得到了极大改善。实验波形证明所提改进方案在降低转矩波动、电流谐波方面具有更加明显的优势, 极大提高了电机的运行性能, 增强了系统的鲁棒性。

## 5 结论

为了实现永磁同步电机模型预测转矩控制的权重系数在线求解, 提出一种改进高斯鸽群算法。该算法将  $i_d$ 、 $i_q$  误差均方根作为设计代价函数的依据, 对代价函数进行最小化设计, 并在传统的高斯变异算子基础上增加了自适应调整动态参数, 提高寻优精度。通过权重系数自整定, 避免了传统的将转矩、磁链转换成同一量纲带来的转换误差。最后通过仿真及实验, 分别将 GPIO、PIO 和 PSO 三种算法与 MPTC 结合, 求解权重系数。仿真及实验结果表明, 改进 GPIO 求解的权重系数在降低转矩误差以及电流谐波方面均优于传统方法, 该方法对于非线性、多变量问题的寻优具有极高的精确性和优越性。

## 参考文献

- [1] 王雨虹, 张威, 韩冰, 等. 基于 LMI 的永磁同步电机鲁棒  $H_\infty$  自补偿滑模控制[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(5): 81-90.  
WANG Yuhong, ZHANG Wei, HAN Bing, et al. Robust  $H_\infty$  self-compensation sliding mode control of a permanent magnet synchronous motor based on linear matrix inequality[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(5): 81-90.
- [2] 张晓光, 张亮, 侯本帅. 永磁同步电机优化模型预测转矩控制[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(16): 4800-4809, 4905.  
ZHANG Xiaoguang, ZHANG Liang, HOU Benshuai. Improved model predictive torque control of permanent magnet synchronous motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(16): 4800-4809, 4905.
- [3] 俞沛宙, 王澍, 杨继辉, 等. 基于灰狼优化的永磁同步电机自适应反推鲁棒控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(2): 39-46.  
YU Peizhou, WANG Shu, YANG Jihui, et al. Adaptive backstepping robust control strategy of PMSM based on grey wolf optimization[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(2): 39-46.
- [4] JIANG X, XIE M, JI A, et al. Implicit model predictive control with continuous control set of PMSM drive

- systems[C]// 2020 IEEE 9th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC2020-ECCE Asia), November 29-December 2, 2020, Nanjing, China: 185-190.
- [5] 李耀华, 赵承辉, 周逸凡, 等. 基于数据驱动的永磁同步电机深度神经网络控制[J]. 电机与控制学报, 2022, 26(1): 115-125.  
LI Yaohua, ZHAO Chenghui, ZHOU Yifan, et al. Deep neural network control for PMSM based on data drive[J]. Electric Machines and Control, 2022, 26(1): 115-125.
- [6] 陈汝兵, 曹太强, 郭筱瑛, 等. 基于MRAS的永磁同步电机无速度传感器控制[J]. 电测与仪表, 2021, 58(8): 179-184.  
CHEN Rubing, CAO Taiqiang, GUO Xiaoying, et al. Speed sensorless control of permanent magnet synchronous motors based on MRAS[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(8): 179-184.
- [7] 曹亚丽, 曹竣奥, 宋昕, 等. 一种改进滑模观测器的PMSM 矢量控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(16): 104-111.  
CAO Yali, CAO Jun'ao, SONG Xin, et al. Research on vector control of PMSM based on an improved sliding mode observer[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(16): 104-111.
- [8] CARLOS C Z, ROGER R J, ANTONI G. PMSM parameter estimation for sensorless FOC based on differential power factor[J]. IEEE Transactions On Instrumentation and Measurement, 2021, 70.
- [9] 吕英俊, 刘卓伟, 苏涛, 等. 异步电机无传感器矢量控制极低速与零速性能研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(20): 6095-6103, 6190.  
LÜ Yingjun, LIU Zhuowei, SU Tao, et al. Research of sensorless vector control performance for induction motor at very low-speed and zero-speed[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(20): 6095-6103, 6190.
- [10] 张立伟, 李行, 宋佩佩, 等. 基于新型滑模观测器的永磁同步电机无传感器矢量控制系统[J]. 电工技术学报, 2019, 34(增刊 1): 70-78.  
ZHANG Liwei, LI Xing, SONG Peipei, et al. Sensorless vector control using a new sliding mode observer for permanent magnet synchronous motor speed control system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(S1): 70-78.
- [11] El OUANJLI N, DEROUICH A, El GHZIZAL A, et al. Direct torque control of doubly fed induction motor using three-level NPC inverter[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(3): 196-204.
- [12] 张志文, 赵健康, 周腊吾, 等. 基于 ILC 算法和 SVM 调制的 PMSM DTC 控制[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(19): 63-70.  
ZHANG Zhiwen, ZHAO Jiankang, ZHOU Lawu, et al. PMSM DTC based on ILC algorithm and SVM modulation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(19): 63-70.
- [13] El DAOUDI S, LAZRAK L. Comparison between PI-DTC-SPWM and fuzzy logic for a sensorless asynchronous motor drive[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(4): 430-442.
- [14] 冯凌, 付建国, 廖丽诚, 等. 一种改进的永磁同步牵引电机低开关频率模型预测直接转矩控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(21): 7507-7517.  
FENG Ling, FU Jianguo, LIAO Licheng, et al. An improved low switching frequency model predictive direct torque control strategy for traction permanent magnet synchronous motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(21): 7507-7517.
- [15] 朱益芳. 基于模型预测控制的永磁同步电机的控制策略研究[D]. 深圳: 深圳大学, 2019.  
ZHU Yifang. The study of permanent magnet synchronous motor control strategy based on model predictive control[D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2019.
- [16] 刘勇, 李腾, 赵丹阳, 等. 混合储能系统的能量管理及VDCM-MPC 联合控制[J]. 供用电, 2022, 39(9): 68-75, 82.  
LIU Yong, LI Teng, ZHAO Danyang, et al. Flexible voltage regulation strategy for offshore wind farm with VSC-HVDC[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(9): 68-75, 82.
- [17] 王静, 卢子广. 采用多标量模型的感应电机简化模型预测转矩控制算法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(24): 9053-9062.  
WANG Jing, LU Ziguang. Simplified model predictive torque control algorithm of induction motor using multi-scalar model[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(24): 9053-9062.
- [18] 班斐, 连广坤, 顾国彪, 等. 永磁同步电机单矢量解耦模型预测转矩控制策略研究[J]. 电工电能新技术, 2020, 39(12): 44-51.  
BAN Fei, LIAN Guangkun, GU Guobiao, et al. Research on single vector decoupling model predictive torque control strategy for PMSM[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2020, 39(12): 44-51.
- [19] 滕青芳, 崔宏伟. 基于 ESO 的 PMSM 驱动系统单相电流传感器模型预测转矩控制[J]. 太阳能学报, 2020, 41(9): 129-138.  
TENG Qingfang, CUI Hongwei. ESO-based model predictive torque control for PMSM drive system with



- single phase current sensor[J]. *Acta Energiac Solaris Sinica*, 2020, 41(9): 129-138.
- [20] 李耀华, 秦辉, 苏锦仕, 等. 永磁同步电机模糊自适应变开关次数权重系数模型预测转矩控制[J]. *电机与控制学报*, 2021, 25(2): 102-112.  
LI Yaohua, QIN Hui, SU Jinshi, et al. Model predictive torque control of permanent magnet synchronous motor based on adaptive dynamic weight coefficient using fuzzy control[J]. *Electric Machines and Control*, 2021, 25(2): 102-112.
- [21] 赵勇, 黄文新, 林晓刚, 等. 基于权重系数消除和有限控制集优化的双三相永磁容错电机快速预测直接转矩控制[J]. *电工技术学报*, 2021, 36(1): 3-14.  
ZHAO Yong, HUANG Wenxin, LIN Xiaogang, et al. Fast predictive direct torque control of dual three-phase permanent magnet fault tolerant machine based on weighting factor elimination and finite control set optimization[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2021, 36(1): 3-14.
- [22] 李家祥, 汪凤翔, 柯栋梁, 等. 基于粒子群算法的永磁同步电机模型预测控制权重系数设计[J]. *电工技术学报*, 2021, 36(1): 50-59.  
LI Jiaxiang, WANG Fengxiang, KE Dongliang, et al. Weighting factors design of model predictive control for permanent magnet synchronous machine using particle swarm optimization[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2021, 36(1): 50-59.
- [23] DUAN Haibin, QIAO Peixin. Pigeon-inspired optimization: a new swarm intelligence optimizer for air robot path planning[J]. *International Journal of Intelligent Computing and Cybernetics*, 2014, 7(1).
- [24] 华冰, 孙胜利, 吴云华, 等. 基于 CGAPIO 的航天器编队重构路径规划方法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2021, 47(2): 223-230.  
HUA Bing, SUN Shenggang, WU Yunhua, et al. Path planning method for Spacecraft formation reconfiguration based on CGAPIO[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2021, 47(2): 223-230.
- [25] 张亚平. 鸽群智能算法的改进及其在高超声速飞行控制中的应用[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.  
ZHANG Yaping. Improvement of pigeon-inspired optimization algorithm and its application in hypersonic flight control[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017.
- [26] DOU R, DUAN H. Pigeon inspired optimization approach to model prediction control for unmanned air vehicles[J]. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology: An International Journal*, 2016, 88(1): 108-116.
- [27] YIN Jianghao, DENG Na, ZHANG Jindan. Wireless sensor network coverage optimization based on Yin-Yang pigeon-inspired optimization algorithm for Internet of Things[J]. *Internet of Things*, 2022, 19.

收稿日期: 2022-05-12; 修回日期: 2022-06-29

作者简介:

周立(1963—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为电力电子传动技术与应用; E-mail: 834661681@qq.com

李京明(1994—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力电子传动技术与应用。E-mail: 541660964@qq.com

(编辑 许威)