

永磁同步电机模型预测转矩控制权重系数设计研究

李耀华¹, 刘亚辉¹, 张鑫泉¹, 张 茜¹, 黄汉旋¹, 吴步昊^{2*}

(1. 长安大学 汽车学院, 陕西 西安 710064;

2. 青海职业技术大学 青海省高原汽车电动化与智能化技术重点实验室, 青海 西宁 810016)

Study on the Design of Weighting Factor of Model Predictive Torque Control for PMSM

LI Yaohua¹, LIU Yahui¹, ZHANG Xinquan¹, ZHANG Qian¹,
HUANG Hanxuan¹, WU Buhao^{2*}

(1. School of Automotive, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. Qinghai Province Key Laboratory of High Altitude Automotive Electrification and Intelligence Technology, Qinghai Vocational and Technical University, Xi'ning 810016, China)

Abstract: [Objective] Aiming to the problem of design weighting factor in model predictive control, non-dominated sorting genetic algorithm II (NSGA-II) and Bayesian optimization algorithm are used to design weighting factors in this paper. [Methods] Based on model predictive torque control (MPTC) for permanent magnet synchronous motor (PMSM), NSGA-II and Bayesian optimization algorithm were used to design weighting factors in two scenarios, which were without/with considering switching frequency control, respectively. When without considering switching frequency control, only one weighting factor needed to be designed, when with considering switching frequency control, two weighting factors needed to be designed. And based on the weighting factors designed by two algorithms, a comparison of the two algorithms in terms of control performance, execution time and memory occupancy was carried out. [Results] The results showed that both weighting factors design algorithms were feasible for PMSM MPTC system with/without considering switching frequency control. The weight factors obtained by NSGA-II that minimize the fitness function value were essentially equivalent to the optimal weight factors derived from the Bayesian optimization algorithm, and control

performances were basically equivalent. The control performance of Bayesian optimization algorithm was relatively superior. [Conclusion] NSGA-II can provide a set of Pareto optimal solutions suitable for diverse application scenarios. Characterized by high computational complexity, extended processing times, and substantial memory requirements, it is well-suited for dynamically evolving operational environments. And the Bayesian optimization algorithm is easy to implement and doesn't need too much resource, has better optimization effect and higher optimization efficiency in complex scenarios involving multiple control objectives.

Key words: permanent magnet synchronous motor; model predictive torque control; weighting factor; switching frequency control; non-dominated sorting genetic algorithm II; Bayesian optimization

摘 要: 【目的】针对模型预测控制权重系数设计困难的问题,本文采用非支配排序遗传算法 II(NSGA-II)和贝叶斯优化算法进行权重系数设计。【方法】基于永磁同步电机(PMSM)模型预测转矩控制(MPTC)系统,针对不考虑开关次数控制和考虑开关次数控制两种场景,分别采用NSGA-II和贝叶斯优化算法设计权重系数。不考虑开关次数控制时仅需设计一个权重系数,考虑开关次数控制时需同时设计两个权重系数。基于两种优化算法设计的权重系数,从控制效果、执行时间和内存占用对两种算法进行了对比。【结果】结果表明,对于考虑和不考虑开关次数控制的PMSM MPTC系统,两种权重系数设计算法均

基金项目: 青海省高原汽车电动化与智能化技术重点实验室开放基金(QZDSZ03-202502)

Open Fund of Qinghai Province Key Laboratory of High Altitude Automotive Electrification and Intelligence Technology (QZDSZ03-202502)

可行。NSGA-II 得到的使适应度函数值最小的权重系数与贝叶斯优化算法得到的最优权重系数基本相当, 控制性能也基本相当, 贝叶斯优化算法的控制性能相对略优。

【结论】NSGA-II 可提供一组适合不同应用场景的 Pareto 最优解, 但其算法复杂度高、计算时间长且占用内存大, 适用于动态变化的运行场景。贝叶斯优化算法易于实现、占用资源少, 在多控制目标的复杂场景中具有更好的寻优效果和更高的寻优效率。

关键词: 永磁同步电机; 模型预测转矩控制; 权重系数; 开关次数控制; 非支配排序遗传算法 II; 贝叶斯优化

0 引言

永磁同步电机 (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM) 模型预测转矩控制 (Model Predictive Torque Control, MPTC) 近年来得到高度关注^[1-4]。MPTC 通过预测不同电压矢量作用下转矩和磁链的未来状态, 利用成本函数评估作用效果, 从而选择最优电压矢量。

由于磁链和转矩的量纲不同, MPTC 需设置权重系数。如果考虑开关次数控制, 则需要设置两个权重系数以实现多目标控制。传统方法通过试验法设计权重系数, 但过程较为繁琐, 当需设计的权重系数较多时, 工作量呈指数级上升^[5]。

为了解决权重系数设计问题, 可将不同量纲的控制目标转换为相同量纲或无量纲。文献[6-8]对各控制变量独立排序, 将不同量纲的控制变量转换为无量纲的排序位置, 但排序计算量较大。文献[9-14]将传统多控制目标子成本函数加权求和, 转变为单控制目标的多预测模型的串联或并联形式, 也无需权重系数。文献[15-17]采用模糊控制动态调节权重系数, 但模糊规则的设定有一定主观性, 依靠设计者的先验知识, 且模糊控制的实现较为复杂。文献[18-20]采用粒子群算法、神经网络算法调整权重系数, 但需构造大量训练数据集且算法自身计算量较大。

近年来, 将多目标遗传算法、贝叶斯优化算法应用于模型预测控制的权重系数设计, 取得了较好的效果。文献[21-22]采用多目标遗传算法优化感应电机 MPTC 的权重系数。文献[23-24]利用贝叶斯优化算法调整有限控制集模型预测控制中的噪声模型权重, 以平衡电流跟踪和噪声抑制。

本文基于 PMSM MPTC 系统, 针对不考虑开关次数控制和考虑开关次数控制两种场景, 分别采用非支配排序遗传算法 II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II, NSGA-II) 和贝叶斯优化算法进行权重系数设计, 并从控制效果、执行时间和内存占用 3 方面对两种算法进行对比。结果表明, 两种权重系数设计算法均可行; NSGA-II 得到的令适应度函数值最小的权重系数与贝叶斯优化得到的最优权重系数基本相同, 控制性能也基本相当, 贝叶斯优化算法的控制性能相对略优; NSGA-II 可提供一组适用于不同应用场景的 Pareto 最优解, 但算法复杂度高、计算时间长且占用内存大, 适合动态变化的运行场景; 贝叶斯优化算法在多控制目标的复杂场景中具有更好的寻优效果和更高的寻优效率。

1 PMSM MPTC

定子坐标系下, 忽略定子电阻压降和转子磁链角运动, 表贴式 PMSM 的定子磁链、转矩角与电磁转矩预测模型如式(1)~式(3)所示:

$$\begin{cases} \psi_s(k+1) = \psi_s(k) \sqrt{1+q^2+2q\cos\alpha} \\ q = \frac{V_s \cdot T_s}{\psi_s(k)} \end{cases} \quad (1)$$

$$\delta(k+1) = \delta(k) + \arcsin\left(\frac{q\sin\alpha}{\sqrt{1+q^2+2q\cos\alpha}}\right) \quad (2)$$

$$\begin{aligned} T_e(k+1) &= \frac{3p\psi_s(k+1)\psi_f}{2L_d} \sin[\delta(k+1)] = \\ &= \frac{3p\psi_s(k)}{2L_d} \sqrt{1+q^2+2q\cos\alpha} \cdot \\ &\sin\left[\delta(k) + \arcsin\left(\frac{q\sin\alpha}{\sqrt{1+q^2+2q\cos\alpha}}\right)\right] \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $\psi_s(k)$ 、 $\delta(k)$ 、 $T_e(k)$ 和 $\psi_s(k+1)$ 、 $\delta(k+1)$ 、 $T_e(k+1)$ 分别为 k 时刻和 $k+1$ 时刻的定子磁链、转矩角、电磁转矩; T_s 为采样周期; V_s 、 α 分别为施加电压矢量幅值、施加电压矢量与定子磁链的夹角^[25-26]; ψ_f 为转子磁链; p 为极对数; L_d 为 d 轴定子电感。

两电平三相逆变器可产生 7 个备选电压矢量, 如式(4)所示。其中零电压矢量可由开关状态 000 或 111 生成, 具体选择遵循开关次数最小

原则^[27]。

$$V_s \in \{V_0, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6\} \quad (4)$$

MPTC 成本函数如式(5)所示:

$$g = |T_e(k+1) - T_e^*| + \lambda_1 |\psi_s(k+1) - \psi_s^*| \quad (5)$$

式中: ψ_s^* 、 T_e^* 分别为当前时刻的定子磁链参考值、电磁转矩参考值; λ_1 为磁链控制权重系数。

将开关次数控制作为控制目标之一,开关次数控制成本函数如式(6)所示:

$$g_{\text{switching}} = 2 \times [|S_a(k+1) - S_a(k)| + |S_b(k+1) - S_b(k)| + |S_c(k+1) - S_c(k)|] \quad (6)$$

式中: $S_{abc}(k)$ 为当前时刻逆变器三相开关状态; $S_{abc}(k+1)$ 为下一时刻施加电压矢量对应的逆变器三相开关状态。

考虑开关次数控制的 MPTC 成本函数如式(7)所示:

$$g = |T_e(k+1) - T_e^*| +$$

$$\lambda_1 |\psi_s(k+1) - \psi_s^*| + \lambda_2 g_{\text{switching}} \quad (7)$$

式中: λ_2 为开关次数控制权重系数。

由式(5)和式(7)可知,由于磁链、转矩和开关次数的量纲不同,MPTC 成本函数需要设置权重系数,从而带来权重系数设计的问题。

2 基于 NSGA-II 的权重系数设计

NSGA-II 首先随机生成指定规模的初始种群;其次,通过选择、交叉与变异的遗传操作产生子代种群,父代和子代种群合并后,采用快速非支配排序方法对个体进行分层,并计算每个非支配层中个体的拥挤距离;最后,基于非支配等级和拥挤距离,选择优秀的个体组成新的父代种群。重复上述过程,通过迭代优化逐步逼近 Pareto 最优解集,直到达到预设的迭代次数,提供一组 Pareto 最优解。NSGA-II 流程图如图 1 所示。

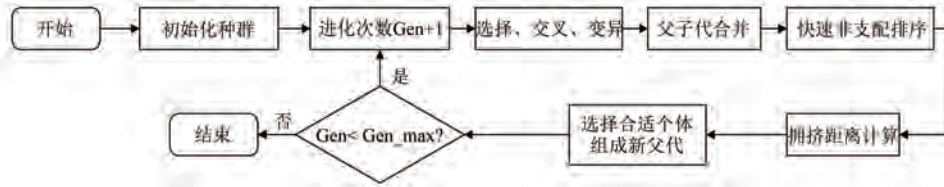


图 1 NSGA-II 流程图

Fig. 1 Flowchart of NSGA-II

2.1 不考虑开关次数控制的 NSGA-II MPTC

对于不考虑开关次数控制的 MPTC,采用 NSGA-II 对式(5)中的 λ_1 进行寻优。

为了评价 Pareto 最优解中每个个体的好坏,需设计适应度函数,从 Pareto 最优解中选出相对最优的权重系数。定义适应度函数 $f(x)$ 如式(8)所示:

$$f(x) = \sqrt{\left(\frac{T_{e_RMSE} - T_{e_RMSE}^*}{T_{e_RMSE}^*}\right)^2 + \left(\frac{\psi_{s_RMSE} - \psi_{s_RMSE}^*}{\psi_{s_RMSE}^*}\right)^2} \quad (8)$$

式中: x 为寻优变量,即 λ_1 ; T_{e_RMSE} 、 ψ_{s_RMSE} 分别为转矩、磁链脉动均方根误差(Root Mean Squared Error, RMSE); $T_{e_RMSE}^*$ 、 $\psi_{s_RMSE}^*$ 分别为 T_{e_RMSE} 、 ψ_{s_RMSE} 的参考值,取值分别为搜索边界对应的 T_{e_RMSE} 、 ψ_{s_RMSE} 最小值。

T_{e_RMSE} 、 ψ_{s_RMSE} 表达式为

$$T_{e_RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_e - T_e^*)^2}{n}} \quad (9)$$

$$\psi_{s_RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\psi_s - \psi_s^*)^2}{n}} \quad (10)$$

式中: n 为采样个数。

基于 Matlab/Simulink 建立 PMSM NSGA-II MPTC 系统仿真模型。其中,采样时间为 5×10^{-5} s;直流母线电压 $U_{dc} = 312$ V;转速环比积分(Proportional Integral, PI)调节器参数 $K_p = 50$ 、 $K_i = 10$;初始参考转速为 500 r/min,2 s 时阶跃至 -500 r/min;初始负载转矩为 10 N·m,1 s 时阶跃至 -10 N·m,3 s 时阶跃至 10 N·m;仿真总时长为 4 s。PMSM MPTC 系统仿真参数如表 1 所示。权重系数 λ_1 的寻优范围为 [10, 300],种群大小为 40,迭代次数为 70 次。 $T_{e_RMSE}^* = 1.7237$ N·m,

在 $\lambda_1 = 10$ 时取得; $\psi_{s_RMSE}^* = 0.002\ 6$ Wb, 在 $\lambda_1 = 300$ 时取得。

表 1 仿真用 PMSM 参数

Tab. 1 Parameters of PMSM used in simulation

参数名称	参数值
定子电阻 R_s/Ω	0.2
转子磁链 ψ_f/Wb	0.175
d 轴电感 L_d/H	0.008 5
q 轴电感 L_q/H	0.008 5
极对数 p	4
转动惯量 $J/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	0.089
粘滞阻尼系数 $B/(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s})$	0.005

经 NSGA-II 迭代寻优, 最终得到的 Pareto 最优解如图 2 所示。将图 2 中每个 Pareto 最优解对应的转矩脉动与磁链脉动代入式(8)所示的适应度函数, 可得使适应度函数值最小的最优解方案 S0、转矩脉动最小的最优解方案 S1 和磁链脉动最小的最优解方案 S2, 分别对应权重系数 $\lambda_{1_S0} = 211.29$ 、 $\lambda_{1_S1} = 10.54$ 和 $\lambda_{1_S2} = 294.26$ 。

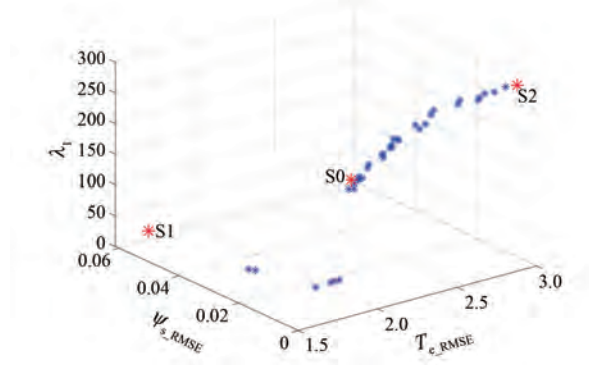


图 2 不考虑开关次数控制的 Pareto 最优解

Fig. 2 Pareto optimal solutions without considering switching frequency control

当 $\lambda_{1_S0} = 211.29$ 时, PMSM MPTC 系统仿真波形如图 3~图 5 所示。

NSGA-II 得到的三种 Pareto 最优解方案的控制性能对比如表 2 所示。其中, f_{ave} 为平均开关频率, 其表达式为

$$f_{ave} = \frac{N_{switching}}{6 \times t} \quad (11)$$

式中: $N_{switching}$ 为逆变器上下桥臂开关总次数; t 为仿真总时长。

由表 2 可知, NSGA-II 得到的三种 Pareto 最

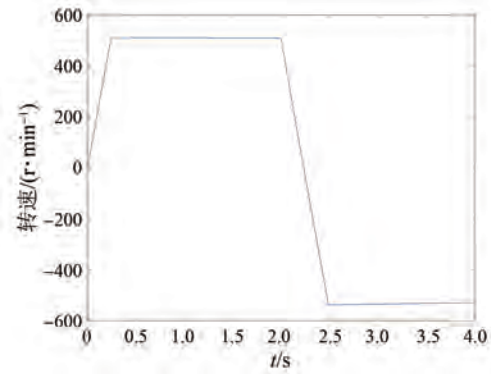


图 3 PMSM 转速 ($\lambda_{1_S0} = 211.29$)

Fig. 3 Speed of PMSM ($\lambda_{1_S0} = 211.29$)

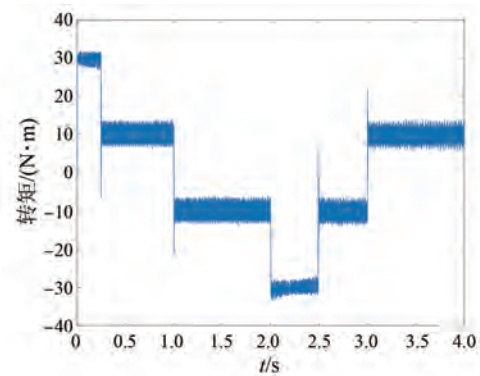


图 4 PMSM 转矩 ($\lambda_{1_S0} = 211.29$)

Fig. 4 Torque of PMSM ($\lambda_{1_S0} = 211.29$)

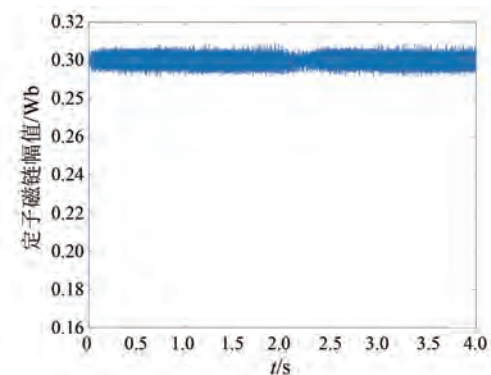


图 5 PMSM 定子磁链幅值 ($\lambda_{1_S0} = 211.29$)

Fig. 5 The amplitude of stator flux of PMSM ($\lambda_{1_S0} = 211.29$)

优解方案中, 方案 S1 转矩脉动最低, 但磁链脉动最大; 方案 S2 磁链脉动最低, 但转矩脉动最大; 方案 S0 介于两者之间, 对应最小的适应度函数值。由于 Pareto 最优解包含一组适用于不同应用场景的解决方案, 可在 Pareto 最优解中选取相对应的权重系数以满足实际应用场景需要。

表 2 不同 Pareto 最优解下不考虑开关次数控制的
PMSM MPTC 系统性能

Tab. 2 Performance of PMSM MPTC system
without considering switching frequency control at
different Pareto optimal solutions

权重系数	$T_{e_RMSE}/$ (N·m)	$\psi_{s_RMSE}/$ Wb	$f_{ave}/$ kHz	$f(x)$
$\lambda_{1_S0} = 211.29$	1.887 1	0.002 9	4.58	0.147 0
$\lambda_{1_S1} = 10.54$	1.708 0	0.061 3	5.91	22.759 7
$\lambda_{1_S2} = 294.26$	2.923 7	0.002 5	4.53	0.696 9

2.2 考虑开关次数控制的 NSGA-II MPTC

对于考虑开关次数控制的 MPTC, 采用 NSGA-II 对式(7)中的 λ_1 与 λ_2 同时进行寻优。

定义适应度函数 $f(x_1, x_2)$ 如式(12)所示:

$$f(x_1, x_2) = \left[\left(\frac{T_{e_RMSE} - T_{e_RMSE}^*}{T_{e_RMSE}^*} \right)^2 + \left(\frac{\psi_{s_RMSE} - \psi_{s_RMSE}^*}{\psi_{s_RMSE}^*} \right)^2 + \left(\frac{f_{ave} - f_{ave}^*}{f_{ave}^*} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (12)$$

式中: x_1, x_2 为寻优变量, 即 λ_1, λ_2 ; f_{ave}^* 为平均开关频率参考值; $T_{e_RMSE}^*$ 、 $\psi_{s_RMSE}^*$ 和 f_{ave}^* 取值分别为搜索边界对应的 T_{e_RMSE} 、 ψ_{s_RMSE} 和 f_{ave} 最小值。

基于 Matlab/Simulink 建立考虑开关次数控制的 PMSM NSGA-II MPTC 系统仿真模型, 仿真条件同 2.1 节。 λ_1 的寻优范围为 $[10, 300]$, λ_2 的寻优范围为 $[0.001, 0.1]$, 种群大小为 120, 迭代次数为 50。 $T_{e_RMSE}^* = 1.762 \text{ N} \cdot \text{m}$, 在 $\lambda_1 = 10$ 、 $\lambda_2 = 0.001$ 时取得; $\psi_{s_RMSE}^* = 0.002 6 \text{ Wb}$, 在 $\lambda_1 = 300$ 、 $\lambda_2 = 0.001$ 时取得; $f_{ave}^* = 3.6 \text{ kHz}$, 在 $\lambda_1 = 10$ 、 $\lambda_2 = 0.1$ 时取得。

经 NSGA-II 迭代寻优, 最终得到的 Pareto 最优解和 Pareto 前沿分别如图 6 和图 7 所示。

将图 6 中每个 Pareto 最优解对应的转矩脉动、磁链脉动与平均开关频率代入式(11)所示的适应度函数中, 可得使适应度函数值最小的最优解方案 S0、转矩脉动最小的最优解方案 S1、磁链脉动最小的最优解方案 S2 和平均开关频率最低的最优解方案 S3, 分别对应权重系数组合 $\lambda_{1_S0} = 194.48$ 、 $\lambda_{2_S0} = 0.048 2$; $\lambda_{1_S1} = 17.68$ 、 $\lambda_{2_S1} = 0.003 6$; $\lambda_{1_S2} = 300$ 、 $\lambda_{2_S2} = 0.099 6$ 和 $\lambda_{1_S3} = 10$ 、 $\lambda_{2_S3} = 0.099 7$ 。

当 $\lambda_{1_S0} = 194.48$ 、 $\lambda_{2_S0} = 0.048 2$ 时, PMSM

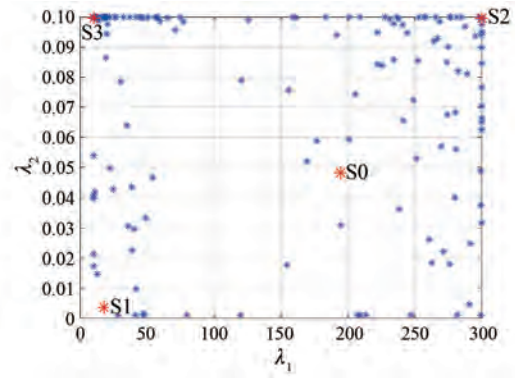


图 6 考虑开关次数控制的 Pareto 最优解

Fig. 6 Pareto optimal solutions with considering switching frequency control

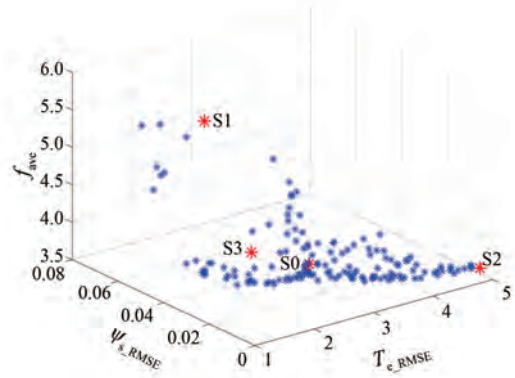


图 7 考虑开关次数控制的 Pareto 前沿

Fig. 7 Pareto front with considering switching frequency control

MPTC 系统仿真波形如图 8~图 10 所示。

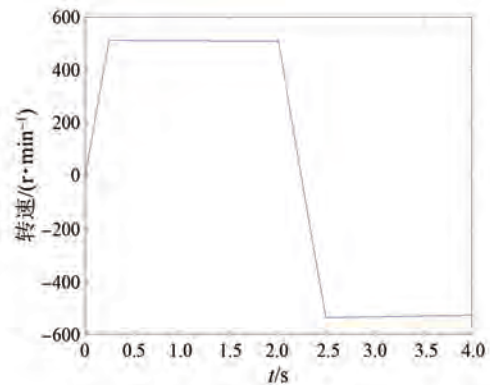


图 8 PMSM 转速 ($\lambda_{1_S0} = 194.48$, $\lambda_{2_S0} = 0.048 2$)

Fig. 8 Speed of PMSM ($\lambda_{1_S0} = 194.48$, $\lambda_{2_S0} = 0.048 2$)

NSGA-II 得到的四种最优解方案的控制性能对比如表 3 所示。

由表 3 可知, NSGA-II 得到的四种 Pareto 最优解方案中, 方案 S1 转矩脉动最低, 但平均开关

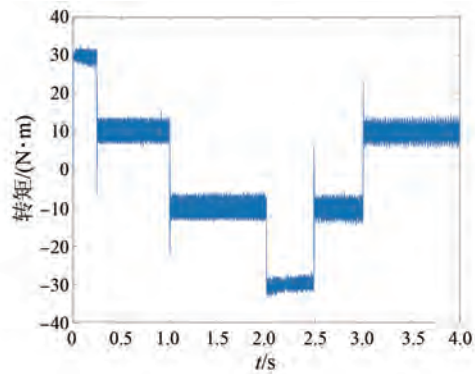


图 9 PMSM 转矩 ($\lambda_{1_{s0}}=194.48, \lambda_{2_{s0}}=0.048\ 2$)

Fig. 9 Torque of PMSM ($\lambda_{1_{s0}}=194.48, \lambda_{2_{s0}}=0.048\ 2$)

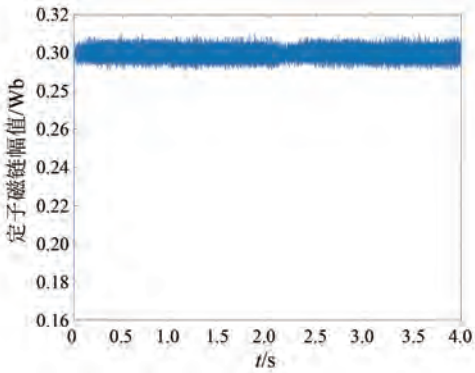


图 10 PMSM 定子磁链幅值 ($\lambda_{1_{s0}}=194.48, \lambda_{2_{s0}}=0.048\ 2$)

Fig. 10 The amplitude of stator flux of PMSM ($\lambda_{1_{s0}}=194.48, \lambda_{2_{s0}}=0.048\ 2$)

表 3 不同 Paetro 最优解下考虑开关次数控制的 PMSM MPTC 系统性能

Tab. 3 Performance of the PMSM MPTC system with considering switching frequency control at different Pareto optimal solutions

权重系数	$T_{e_RMSE}/$ (N·m)	$\psi_{s_RMSE}/$ Wb	$f_{ave}/$ kHz	$f(x_1, x_2)$
$(\lambda_{1_{s0}}, \lambda_{2_{s0}}) =$ $(194.48, 0.048\ 2)$	2.026 0	0.003 1	4.32	0.305 1
$(\lambda_{1_{s1}}, \lambda_{2_{s1}}) =$ $(17.678, 0.003\ 6)$	1.677 4	0.039 8	5.78	14.562 4
$(\lambda_{1_{s2}}, \lambda_{2_{s2}}) =$ $(300, 0.099\ 6)$	4.884 4	0.002 8	3.64	1.775 2
$(\lambda_{1_{s3}}, \lambda_{2_{s3}}) =$ $(10, 0.099\ 7)$	3.017 2	0.054 2	3.53	20.188 4

频率最大;方案 S2 磁链脉动最低,但转矩脉动最大;方案 S3 平均开关频率最低,但转矩脉动和磁

链脉动较大;方案 S0 综合考虑三个控制目标,对应最小的适应度函数值。

3 基于贝叶斯优化算法的权重系数设计

贝叶斯优化在每次迭代时利用已知点的信息来确定下一个搜索点,可在目标函数未知的情况下得到其极值。贝叶斯优化算法首先使用高斯过程回归对目标函数进行建模,计算搜索空间中每一点的函数值均值和方差,建立目标函数的概率分布模型;其次基于模型的不确定性信息构造采集函数,确定下一个采样点的位置,判断是否满足目标或迭代终止。贝叶斯优化算法流程图如图 11 所示。

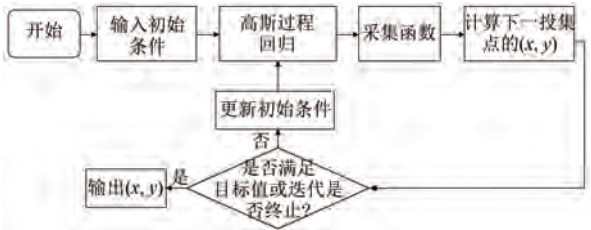


图 11 贝叶斯优化算法流程图

Fig. 11 Flowchart of Bayesian optimization algorithm

3.1 不考虑开关次数控制的贝叶斯优化 MPTC

采用贝叶斯优化对式(5)中的 λ_1 进行寻优,其中采集函数使用期望改进 (Expected Improvement, EI) 函数, λ_1 寻优范围为 $[10, 300]$, 寻优步长为 0.1。贝叶斯优化同样需要设置适应度函数 $f(x)$, 适应度函数及适应度函数参考值与式(8)相同。给定初始条件 $[x_i, f(x_i)]$ 为 $(10, 25.085\ 2)$ 、 $(150, 0.259)$ 和 $(300, 0.551\ 8)$, 迭代寻优 100 次。不考虑开关次数控制的贝叶斯优化算法第 1 次迭代结果如图 12 所示。

由图 12 可知, EI 函数最大时所对应的 x_1 为 197, 计算得到此时的转矩脉动、磁链脉动及目标函数 $f(x_1)$, 并将 $[x_1, f(x_1)]$ 纳入初始条件中进行第 2 次迭代。以此类推, 重复进行迭代。随着整条曲线在搜索区间内的已知点逐渐增多, 各点处方差逐渐减小。经过 100 次迭代寻优后得到令适应度函数值最小的最优解为 $x = 197$ 。

为了获得更精确的最优解, 将寻优区间缩小在已知最优解附近, 进行第二轮迭代, λ_1 寻优范围为 $[150, 250]$, 寻优步长不变, 给定初始条件

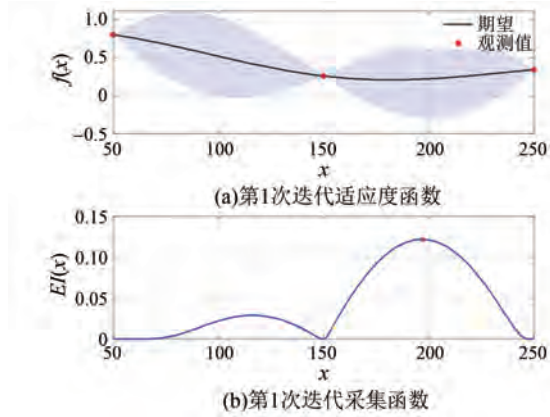


图 12 不考虑开关次数控制的贝叶斯优化算法
第 1 次迭代结果

Fig. 12 First iteration results of Bayesian optimization algorithm without considering switching frequency control

$[x_i, f(x_i)]$ 为 $(150, 0.259)$ 、 $(197, 0.159\ 7)$ 和 $(250, 0.340\ 8)$ 。经过第二轮 100 次迭代寻优得到使适应度函数值最小的最优解为 $x=204.53$ 。

分别采用第一轮迭代寻优和第二轮迭代寻优得到的最优权重系数的 PMSM MPTC 系统性能如表 4 所示。

表 4 贝叶斯优化下不考虑开关次数控制的
PMSM MPTC 系统性能

Tab. 4 Performance of the PMSM MPTC system without considering switching frequency control at Bayesian optimization

权重系数	$T_{e_RMSE}/$ (N·m)	$\psi_{s_RMSE}/$ Wb	$f_{ave}/$ kHz	$f(x)$
$\lambda_1 = 197$	1.904 9	0.002 9	4.58	0.159 7
$\lambda_1 = 204.53$	1.872 1	0.002 9	4.58	0.144 7

由表 4 可知,第二轮迭代后最优权重系数对应的转矩脉动和适应度函数值均低于第一轮迭代。第二轮迭代和第一轮迭代最优权重系数对应的适应度函数值相差不大,因此,贝叶斯优化两轮迭代即可。

当 $\lambda_1 = 204.53$ 时, PMSM MPTC 系统仿真波形如图 13~图 15 所示。

3.2 考虑开关次数控制的贝叶斯优化 MPTC

采用贝叶斯优化对式(7)中的 λ_1 和 λ_2 同时进行寻优。采集函数使用 EI 函数; λ_1 寻优范围为 $[10, 300]$, 寻优步长为 1; λ_2 寻优范围为

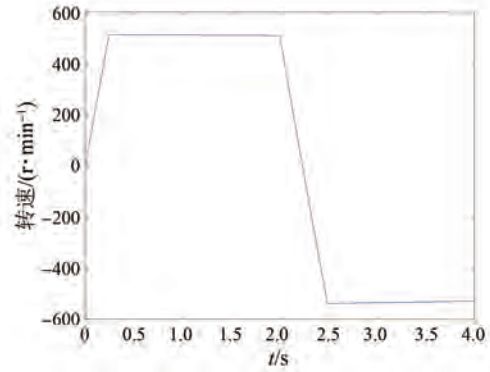


图 13 PMSM 转速 ($\lambda_1 = 204.53$)

Fig. 13 Speed of PMSM ($\lambda_1 = 204.53$)

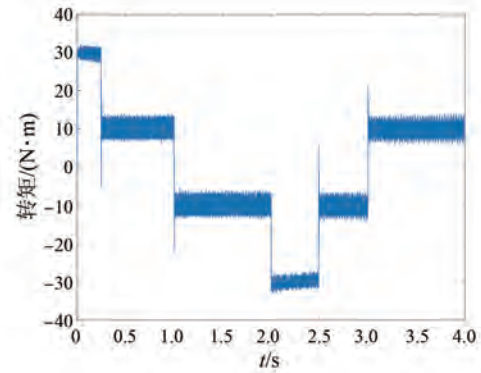


图 14 PMSM 转矩 ($\lambda_1 = 204.53$)

Fig. 14 Torque of PMSM ($\lambda_1 = 204.53$)

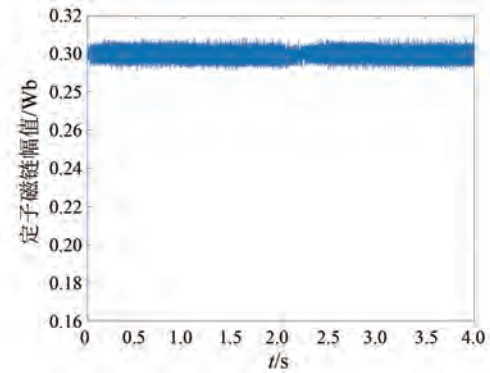


图 15 PMSM 定子磁链幅值 ($\lambda_1 = 204.53$)

Fig. 15 The amplitude of stator flux of PMSM ($\lambda_1 = 204.53$)

$[0.001, 0.1]$, 寻优步长为 0.001; 适应度函数及适应度函数参考值与式(11)相同。给定初始条件 $[x_{1i}, x_{2i}, f(x_{1i}, x_{2i})]$ 为 $(100, 0.001, 0.476\ 3)$ 、 $(100, 0.1, 0.615\ 8)$ 、 $(300, 0.001, 0.709)$ 和 $(300, 0.1, 1.693\ 1)$, 迭代寻优 100 次。

考虑开关次数控制的贝叶斯优化算法第 1 次

迭代结果如图 16 所示。

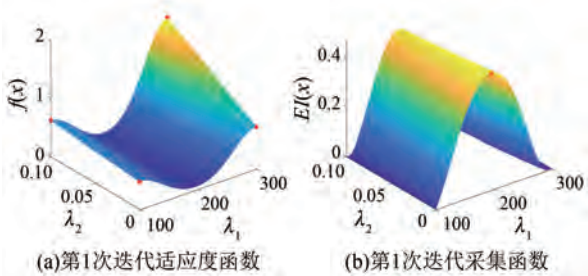


图 16 考虑开关次数控制的贝叶斯优化算法
第 1 次迭代结果

Fig. 16 First iteration results of the Bayesian optimization algorithm with considering switching frequency control

由图 16 可知, EI 函数最大时对应的 (x_{11}, x_{21}) 为 $(196, 0.001)$, 计算得到此时的转矩脉动、磁链脉动和适应度函数 $f(x_{11}, x_{21})$, 并将 $[x_{11}, x_{21}, f(x_{11}, x_{21})]$ 纳入初始条件中进行第 2 次迭代, 以此类推重复进行迭代。经过 100 次迭代寻优后得到使适应度函数值最小的最优解为 $(x_1, x_2) = (207, 0.029)$ 。

为了获得更精确的最优解, 将寻优区间缩小在已知最优解附近, 进行第二轮迭代。 λ_1 寻优范围为 $[200, 250]$, 寻优步长为 1; λ_2 寻优范围为 $[0.01, 0.05]$, 寻优步长为 0.001。给定初始条件 $[x_{1i}, x_{2i}, f(x_{1i}, x_{2i})]$ 为 $(200, 0.01, 0.352\ 9)$ 、 $(200, 0.05, 0.329\ 2)$ 、 $(250, 0.01, 0.415\ 3)$ 和 $(250, 0.05, 0.618\ 3)$ 。第二轮 100 次迭代寻优后得到使适应度函数值最小的最优解为 $(x_1, x_2) = (200.3, 0.042)$ 。

采用第一轮迭代寻优和第二轮迭代寻优得到的最优权重系数的 PMSM MPTC 系统性能如表 5 所示。

表 5 贝叶斯优化下考虑开关次数控制的
PMSM MPTC 系统性能

Tab. 5 Performance of the PMSM MPTC system with considering switching frequency control at Bayesian optimization

权重系数	$T_{e_RMSE}/$ (N·m)	$\psi_{s_RMSE}/$ Wb	$f_{ave}/$ kHz	$f(x)$
$(\lambda_1, \lambda_2) =$ (207, 0.029)	2.036 6	0.003	4.37	0.292 0
$(\lambda_1, \lambda_2) =$ (200.3, 0.042)	2.002 4	0.003	4.25	0.273 3

由表 5 可知, 第二轮迭代得到的最优权重系数下的转矩脉动、平均开关频率和适应度函数值均低于第一轮。第二轮迭代和第一轮迭代得到的最优权重系数对应的适应度函数值相差不大, 因此贝叶斯优化迭代两轮即可。

当 $\lambda_1 = 200.3, \lambda_2 = 0.042$ 时, PMSM MPTC 系统仿真波形如图 17~图 19 所示。

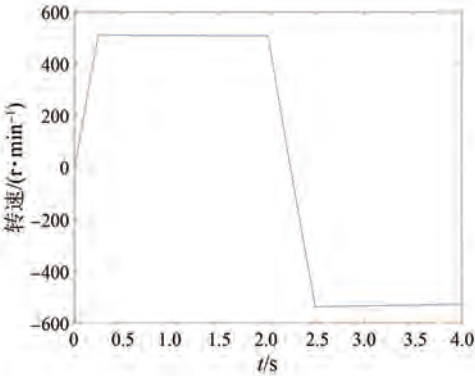


图 17 PMSM 转速 ($\lambda_1 = 200.3, \lambda_2 = 0.042$)
Fig. 17 Speed of PMSM ($\lambda_1 = 200.3,$
 $\lambda_2 = 0.042$)

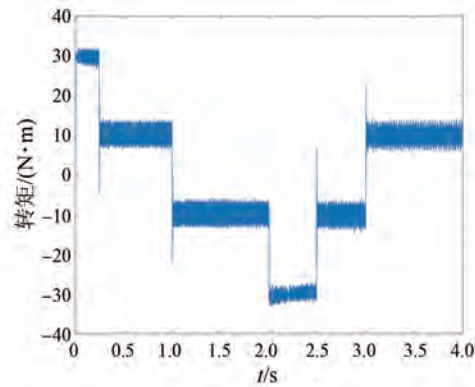


图 18 PMSM 转矩 ($\lambda_1 = 200.3, \lambda_2 = 0.042$)
Fig. 18 Torque of PMSM ($\lambda_1 = 200.3,$
 $\lambda_2 = 0.042$)

4 权重系数寻优算法对比

NSGA-II 与贝叶斯优化算法本质上都是在空间中通过迭代寻优搜索最优解的搜索算法。从寻优效果、执行时间和占用内存 3 方面对 NSGA-II 与贝叶斯优化算法进行对比。

采用 NSGA-II 方案 S0 对应的权重系数与贝叶斯优化得到最优权重系数的 PMSM MPTC 系统性能如表 6 所示。

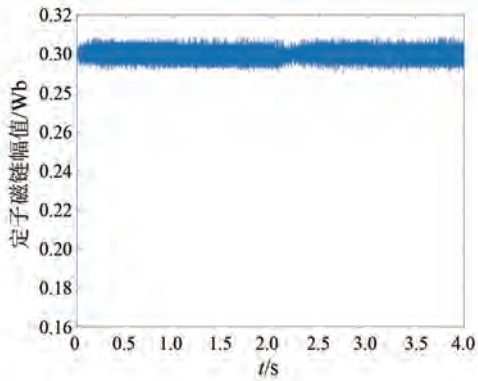


图 19 PMSM 定子磁链幅值 ($\lambda_1 = 200.3$, $\lambda_2 = 0.042$)

Fig. 19 The amplitude of stator flux of PMSM ($\lambda_1 = 200.3$, $\lambda_2 = 0.042$)

表 6 两种优化算法下 PMSM MPTC 系统性能对比

Tab. 6 Performance comparison of PMSM MPTC system under two optimization algorithms

权重系数	$T_{e_RMSE}/$ (N · m)	$\psi_{s_RMSE}/$ Wb	$f_{ave}/$ kHz	$f(x)$	
不考虑 开关次 数控制	$\lambda_{1_s0} =$ 211.29	1.887 1	0.002 9	4.58	0.147 0
	$\lambda_1 =$ 204.53	1.872 1	0.002 9	4.58	0.144 7
考虑开 关次数 控制	$(\lambda_{1_s0}, \lambda_{2_s0}) =$ (194.48, 0.048 2)	2.026 0	0.003 1	4.32	0.305 1
	$(\lambda_1, \lambda_2) =$ (200.3, 0.042)	2.002 4	0.003 0	4.25	0.273 3

由表 6 可知,NSGA-II 得到的使适应度函数最小值对应的权重系数与贝叶斯优化得到的最优权重系数基本相当,控制性能也基本相当,贝叶斯优化算法的控制性能相对略优。

NSGA-II 与贝叶斯优化算法的执行时间与占用内存对比如表 7 所示。其中贝叶斯优化算法为两轮优化总执行时间与总占用内存。

由表 7 可知,NSGA-II 的执行时间与占用内存均远大于贝叶斯优化算法,表明 NSGA-II 的复杂度高于贝叶斯优化算法。特别是考虑开关次数控制时,NSGA-II 的执行时间与占用内存大幅增加,而贝叶斯优化算法仅略微增加。这是因为贝叶斯优化仅得到一个最优解,而 NSGA-II 提供的是一组包含适用于不同应用场景的 Pareto

最优解,所占用的资源更多。因此,如果运行场景包含多个控制目标,运算资源有限且需要进行快速求解,则更适合采用贝叶斯优化算法进行寻优,以满足更优的控制性能、更少的运算时间和计算资源占用;如果需要根据实际需求的需求选取不同的权重系数,则更适合采用 NSGA-II。

表 7 两种优化算法的执行时间和占用内存对比

Tab. 7 Comparison of execution time and memory consumption between two optimization algorithms

控制目标	算法名称	执行时间/s	占用内存/GB
不考虑开关 次数控制	NSGA-II	21 488.3	63.27
	贝叶斯优化	547.1	2.32
考虑开关 次数控制	NSGA-II	39 482.2	91.17
	贝叶斯优化	555.6	2.37

5 结语

NSGA-II 与贝叶斯优化算法均可用于 PMSM MPTC 的权重系数设计。NSGA-II 得到的使适应度函数值最小的权重系数与贝叶斯优化算法得到的最优权重系数的控制性能基本相当,贝叶斯优化算法的控制性能相对略优。

NSGA-II 可提供一组适用于不同应用场景的 Pareto 最优解,但算法复杂度较高、计算时间长且占用内存大,适合动态变化的运行场景;贝叶斯优化算法易于实现、占用资源少,在多控制目标的复杂场景中具有更好的寻优效果和更高的寻优效率。

利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献

李耀华进行了方案设计和论文撰写,刘亚辉、张鑫泉、张茜进行了仿真研究,黄汉旋、吴步昊进行了论文的审核和修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

The scheme design and paper writing were carried out by Li Yaohua. The simulation study was conducted by Liu Yahui, Zhang Xinquan and Zhang

Qian. The manuscript was reviewed and revised by Huang Hanxuan and Wu Buhao. All authors have read and approved the final version of the manuscript for submission.

参考文献

- [1] Rodriguez J, Garica C, Mora A, et al. Latest advances of model predictive control in electrical drives-Part I: Basic concepts and advanced strategies [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(4): 3927-3942.
- [2] Karamanakos P, Geyer T. Guidelines for the design of finite control set model predictive controllers [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(7): 7434-7450.
- [3] 王治国, 郑泽东, 李永东, 等. 交流电机模型预测控制综述[J]. 电机与控制学报, 2022, 26(11): 14-30.
Wang Z G, Zhen Z D, Li Y D, et al. A review of model predictive control for AC motor [J]. Electric Machines and Control, 2022, 26(11): 14-30.
- [4] 李耀华, 苏锦仕, 秦辉, 等. 永磁同步电机有限控制集模型预测转矩控制系统研究[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(12): 8-15+46.
Li Y H, Su J S, Qin H, et al. Finite control set model predictive torque control of permanent magnet synchronous motor system [J]. Electric Machines & Control Application, 2019, 46(12): 8-15+46.
- [5] Cortes P, Kouro S, Rocca B L, et al. Guidelines for weighting factors design in model predictive control of power converters and drives [C]//2009 IEEE International Conference on Industrial Technology, Churchill, 2009.
- [6] Eswar K M R, Kumar K V P, Kumar T V. Modified predictive torque and flux control for open end winding induction motor drive based on ranking method [J]. IET Electric Power Applications, 2018, 12(4): 463-473.
- [7] 李耀华, 秦辉, 苏锦仕, 等. 基于排序法的表贴式永磁同步电机模型预测转矩控制[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(11): 6-13.
Li Y H, Qin H, Su J S, et al. Model predictive control for surface permanent magnet synchronous motor based on ranking approach [J]. Electric Machines & Control Application, 2021, 48(11): 6-13.
- [8] 李耀华, 秦辉, 苏锦仕. 永磁同步电机模型预测转矩控制模糊排序法研究[J]. 控制理论与应用, 2023, 40(8): 1497-1508.
Li Y H, Qin H, Su J S. Model predictive torque control for permanent magnet synchronous motor based on fuzzy ranking approach [J]. Control Theory & Applications, 2023, 40(8): 1497-1508.
- [9] Norambuena M, Rodriguez J, Zhang Z, et al. A very simple strategy for high-quality performance of AC machines using model predictive control [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(1): 794-800.
- [10] Zhang Z, Zhang B, Norambuena M, et al. Generalized sequential model predictive control of IM drives with field-weakening ability [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(9): 8944-8955.
- [11] 李耀华, 秦辉, 苏锦仕, 等. 永磁同步电机级联模型预测转矩控制优化[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(4): 16-25.
Li Y H, Qin H, Su J S, et al. Optimization of cascaded model predictive torque control for permanent magnet synchronous motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(4): 16-25.
- [12] Wang F X, Xie H T, Chen Q, et al. Parallel predictive torque control for induction machines without weighting factors [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(2): 1779-1788.
- [13] 谢昊天, 汪凤翔, 柯栋梁, 等. 基于集成优化的感应电机无权重系数预测转矩控制[J]. 电工技术学报, 2022, 37(12): 2992-3003.
Xie H T, Wang F X, Ke D L, et al. Ensemble optimization based weighting factor less predictive torque control for induction machines [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(12): 2992-3003.
- [14] 李耀华, 张鑫泉, 董国庆, 等. 永磁同步电机并联法模型预测转矩控制[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(2): 41-48.
Li Y H, Zhang X Q, Dong G Q, et al. Parallel model predictive torque control for permanent magnet synchronous motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(2): 41-48.
- [15] 涂文聪, 骆光照, 刘卫国. 基于模糊动态代价函

- 数的永磁同步电机有限控制集模型预测电流控制[J]. 电工技术学报, 2017, 32(16): 89-97.
- Tu W C, Luo G Z, Liu W G. Finite-control-set model predictive current control for permanent magnet synchronous motor based on dynamic cost function using fuzzy method [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(16): 89-97.
- [16] 史涔溁, 马红如, 陈卓易, 等. 永磁同步电机模糊代价函数预测转矩控制[J]. 电机与控制学报, 2022, 26(1): 1-8.
- Shi C W, Ma H R, Chen Z Y, et al. Fuzzy tuning of weight coefficient in model predictive torque control of PMSM [J]. Electric Machines and Control, 2022, 26(1): 1-8.
- [17] 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 Y H, Qin H, Su J S, 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.
- [18] 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+76.
- Li J X, Wang F X, Ke D L, 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+76.
- [19] Tomislav D, Mateja N. Weighting factor design in model predictive control of power electronic converters: An artificial neural network approach [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(11): 8870-8880.
- [20] 李程, 廖丽诚, 冯凌, 等. 神经网络在永磁同步电机模型预测控制参数寻优中的应用[J]. 电源学报, 2021, 19(1): 86-94.
- Li C, Liao L C, Feng L, et al. Application of neural network to parameters optimization of permanent magnet synchronous motor under model predictive control [J]. Journal of Power Supply, 2021, 19(1): 86-94.
- [21] Guazzelli P R U, Aadrade P W C, Oliveira C M R, et al. Weighting factors optimization of predictive torque control of induction motor by multiobjective genetic algorithm [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 34(7): 6628-6638.
- [22] Mohammadi A, Asadi H, Mohamed S, et al. Multiobjective and interactive genetic algorithms for weight tuning of a model predictive control-based motion cueing algorithm [J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2019, 49(9): 3471-3481.
- [23] Kroneisl M, Smidl V. Bayesian optimization of FCS-MPC parameters for reduction of induction motor electromagnetic noise [C]//2020 IEEE 29th International Symposium on Industrial Electronics, Delft, 2020.
- [24] Kroneisl M, Smidl V, Peroutka Z, et al. Predictive control of IM drive acoustic noise [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(7): 5666-5676.
- [25] 李耀华, 师浩浩, 孟祥臻. 表面式永磁同步电机直接转矩控制系统简化预测控制策略[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(4): 96-103.
- Li Y H, Shi H H, Meng X Z. Simplified predictive control for direct torque control of surface permanent magnet synchronous motor [J]. Electric Machines and Control, 2020, 24(4): 96-103.
- [26] 李耀华, 刘洋, 孟祥臻. 一种表面式永磁同步电机有限状态集模型预测直接转矩控制[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(8): 33-43.
- Li Y H, Liu Y, Meng X Z. Finite control set model predictive direct torque control of surface permanent magnet synchronous motor [J]. Electric Machines and Control, 2020, 24(8): 33-43.
- [27] 李耀华, 杨启东, 曲亚飞. 自适应变电压矢量PMSM直接转矩控制开关表[J]. 电机与控制学报, 2019, 23(9): 75-83.
- Li Y H, Yang Q D, Qu Y F. Adaptive variable voltage vectors switching table in direct torque control for PMSM [J]. Electric Machines and Control, 2019, 23(9): 75-83.

收稿日期:2025-08-24

收到修改稿日期:2025-10-20

作者简介:

李耀华(1980—),男,博士,副教授,研究方向为电机电控与新能源汽车技术,nuaaliyaohua@126.com;

*通信作者:吴步昊(1996—),男,博士,助教,研究方向为车辆系统动力学,1207688117@qq.com。