

# 永磁同步电机模型预测转矩控制客观评价法综述<sup>\*</sup>

李耀华, 张鑫泉, 邓益志, 童瑞齐, 刘晶郁  
(长安大学 汽车学院, 陕西 西安 710064)

**摘要:** 由于永磁同步电机模型预测转矩控制的控制目标量纲不同, 其成本函数需加权求和, 但权重系数的设计与调节较为困难。将模糊决策法、VIKOR 法、TOPSIS 法、变异系数赋权法和熵值赋权法等客观评价法应用于永磁同步电机模型预测转矩控制以解决上述问题。对于仅考虑磁链和转矩控制的永磁同步电机模型预测转矩控制, 上述方法均是可行的, 无需权重系数, 但在一定程度上增加了计算负担。不同策略的控制性能存在一定的差异, 但整体基本相当。由综合性能对比可知, TOPSIS 法的控制性能相对最优。

**关键词:** 永磁同步电机; 模型预测转矩控制; 客观评价法; 权重系数; 开关次数控制

**中图分类号:** TM351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2023)11-0011-11

**doi:** 10.12177/emca.2023.129

## A Review of Objective Evaluation Method of Model Predictive Torque Control for Permanent Magnet Synchronous Motor<sup>\*</sup>

LI Yaohua, ZHANG Xinquan, DENG Yizhi, TONG Ruiqi, LIU Jingyu  
(School of Automotive, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** The cost functions of model predictive torque control (MPTC) of permanent magnet synchronous motor (PMSM) need to be weighted and summed because of the different control objective dimensions, but these are difficult to design and adjust the weight coefficients. The objective evaluation methods such as fuzzy decision method, VIKOR method, TOPSIS method, coefficient of variation weighting method and entropy weighting method are applied to the model predictive torque control of permanent magnet synchronous motor to solve the above problems. Examining the model predictive torque control of permanent magnet synchronous motor with flux linkage and torque control, the above methods are feasible and do not need weight coefficients, but the calculation load is increased to a certain extent. There are some differences in the control performance of different strategies, but the overall control performance is basically the same. According to the comprehensive performance comparison, the control performance of TOPSIS method is relatively optimal.

**Key words:** permanent magnet synchronous motor (PMSM); model predictive torque control (MPTC); objective evaluation method; weight coefficient; switching times control

## 0 引言

永磁同步电机(PMSM)模型预测转矩控制(MPTC)通过成本函数直接控制磁链和转矩, 选择令成本函数最小的开关状态作为下一时刻的输出, 受到了广泛关注<sup>[1-5]</sup>。作为控制系统的核心,

磁链和转矩的重要性相当, 但二者的量纲和数量级不同。因此, 需要采用加权求和形式的成本函数, 而权重系数设计和调整较为困难, 尚无理论化的解决途径<sup>[6-7]</sup>。权重系数可通过试验法得到, 但此方法需进行大量前期试验。当控制变量和考虑影响因素增多, 试验次数呈指数型上升<sup>[8-9]</sup>。

收稿日期: 2023-03-27; 收到修改稿日期: 2023-07-21

<sup>\*</sup> 基金项目: 西安市碑林区科技计划项目(GX2252)

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。

为解决这一问题,文献[10-13]采用模糊控制动态调节权重系数,但模糊规则的设定具有一定的主观性,依靠设计者的先验知识。文献[14-15]采用粒子群算法和神经网络算法调整权重系数,但需要构造大量训练数据集且算法自身计算量较大。文献[16]将磁链和转矩转换为相对误差率,但如果含控制目标的参考值不确定,如:开关次数,仍需设计权重系数。文献[17-18]对各控制变量独立排序,成本函数为无量纲的排序位置,但排序计算量较大。文献[19-20]将多目标成本函数加权求和形式转换为单目标成本函数级联形式,从而消除权重系数。

模型预测转矩控制根据磁链和转矩控制效果,从备选电压矢量集中选择最优电压矢量,本质属于多目标最优决策方法。客观评价法根据原始数据之间的关系通过一定的数学方法来选择最优候选对象,结果不依赖于设计者的主观判断,可应用于多目标决策。本文将客观评价法中的模糊决策法、VIKOR法、TOPSIS法、变异系数赋权法和熵值赋权法引入永磁同步电机模型预测转矩控制中,通过仿真,验证客观评价法的可行性。

## 1 永磁同步电机模型预测转矩控制

定子坐标系下,表贴式永磁同步电机定子磁链矢量与转矩预测模型如式(1)和式(2)所示:

$$\begin{cases} \psi_s(k+1) = \psi_s(k) \sqrt{1+q^2+2q\cos\alpha}, \\ q = \frac{\mathbf{V}_s \cdot \mathbf{T}_s}{\psi_s(k)} \end{cases} \quad (1)$$

$$T_e(k+1) = \frac{3p\psi_s(k+1)\psi_f}{2L_d} \sin\delta(k+1) = \frac{3p\psi_f\psi_s(k)}{2L_d} \sqrt{1+q^2+2q\cos\alpha} \cdot$$

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

式中: $\psi_s(k)$ 、 $\delta(k)$ 和 $T_e(k)$ 分别为 $k$ 时刻的定子磁链矢量、转矩角和电磁转矩; $\psi_s(k+1)$ 、 $\delta(k+1)$ 和 $T_e(k+1)$ 分别为 $k+1$ 时刻的定子磁链矢量、转矩角和电磁转矩; $\mathbf{V}_s$ 和 $\alpha$ 分别为施加电压矢量幅值和施加电压矢量与定子磁链的夹角<sup>[14]</sup>; $\psi_f$ 为转子永磁体磁链; $p$ 为电机极对数; $L_d$ 为电机 $d$ 轴电感。

两电平三相逆变器可产生7个备选电压矢量,

如式(3)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。

$$\mathbf{V}_s \in \{\mathbf{V}_0, \mathbf{V}_1, \mathbf{V}_2, \mathbf{V}_3, \mathbf{V}_4, \mathbf{V}_5, \mathbf{V}_6\} \quad (3)$$

定义模型预测转矩控制成本函数如式(4)所示:

$$g = g_{T_e} + \lambda g_{\psi_s} \quad (4)$$

式中: $\lambda$ 为权重系数; $g_{T_e}$ 和 $g_{\psi_s}$ 分别为转矩控制项和磁链控制项。

$$g_{T_e} = |T_e(k+1) - T_e^*| \quad (5)$$

$$g_{\psi_s} = |\psi_s(k+1) - \psi_s^*| \quad (6)$$

式中: $T_e^*$ 和 $\psi_s^*$ 分别为转矩和磁链参考值。

永磁同步电机模型预测转矩系统框图如图1所示。

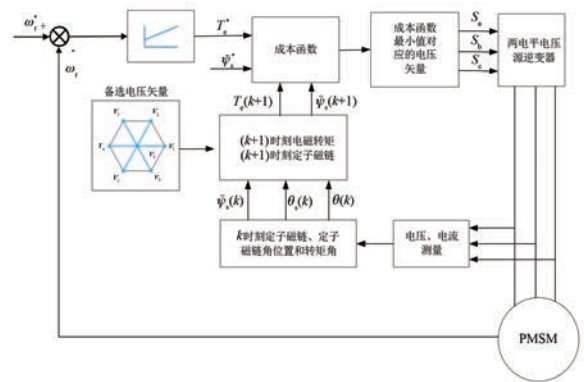


图1 永磁同步电机模型预测转矩系统

在MATLAB/Simulink中建立基于定子坐标系的表贴式永磁同步电机模型预测转矩控制仿真模型。该仿真模型为离散模型,采样时间为 $5 \times 10^{-5}$  s。参考转速初始为500 r/min,2 s时阶跃至-500 r/min;负载转矩初始为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。仿真参数如表1所示。经试验法确定权重系数 $\lambda = 100$ ,电机系统仿真波形如图2~5所示。

表1 仿真系统参数

| 参数名称                                          | 参数值         |
|-----------------------------------------------|-------------|
| 定子电阻 $R_s/\Omega$                             | 0.2         |
| 转子磁链 $\psi_f/\text{Wb}$                       | 0.175       |
| $d$ 轴电感 $L_d/\text{H}$                        | 0.008 5     |
| $q$ 轴电感 $L_q/\text{H}$                        | 0.008 5     |
| 极对数 $p$                                       | 4           |
| 转动惯量 $J/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$           | 0.089       |
| 黏滞阻尼 $F/(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s})$ | 0.005       |
| 转速环PI调节器 $K_p$                                | 50          |
| 转速环PI调节器 $K_i$                                | 10          |
| 参考转矩上下限 $(\text{N}\cdot\text{m})$             | $[-30, 30]$ |
| 直流母线电压 $U_{dc}/\text{V}$                      | 312         |

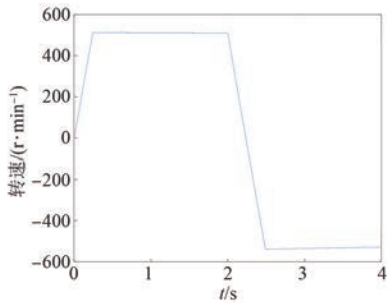


图2 权重系数  $\lambda=100$  下的电机转速

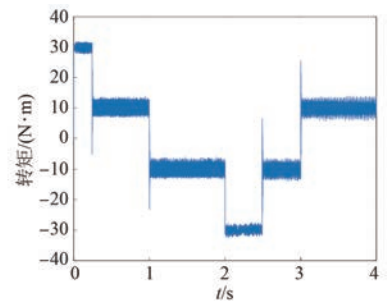


图3 权重系数  $\lambda=100$  下的电机转矩

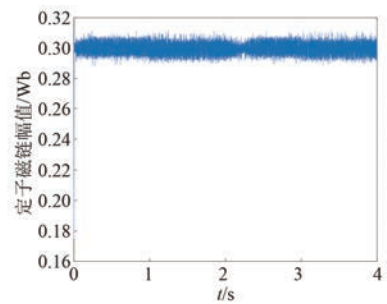


图4 权重系数  $\lambda=100$  下的定子磁链幅值

转矩脉动均方根误差(RMSE)、磁链脉动均方根误差和平均开关频率的定义如式(7)~式(9)所示:

$$T_{rip\_RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_e - T_e^*)^2}{n}} \quad (7)$$

$$\psi_{rip\_RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\psi_s - \psi_s^*)^2}{n}} \quad (8)$$

$$f_{ave} = \frac{N_{switching}}{6 \times t} \quad (9)$$

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

永磁同步电机模型预测转矩控制系统性能如

表2所示。

表2 永磁同步电机模型预测转矩控制系统性能

| $T_{rip\_RMSE}/(N \cdot m)$ | $\psi_{rip\_RMSE}/Wb$ | $f_{ave}/kHz$ |
|-----------------------------|-----------------------|---------------|
| 2.120 6                     | 0.003 3               | 4.86          |

## 2 基于客观评价法模型预测转矩控制

客观评价法需要统一控制变量的数量级,将转矩控制和磁链控制的成本函数标么化,统一在 $[0,1]$ 之间,如式(10)和(11)所示<sup>[21]</sup>:

$$\mu_{T_e} = \frac{g_{T_e} - g_{T_{e\_min}}}{g_{T_{e\_max}} - g_{T_{e\_min}}} \quad (10)$$

$$\mu_{\psi_s} = \frac{g_{\psi_s} - g_{\psi_{s\_min}}}{g_{\psi_{s\_max}} - g_{\psi_{s\_min}}} \quad (11)$$

基于标么化的成本函数如式(12)所示:

$$g = \mu_{T_e} + \mu_{\psi_s} \quad (12)$$

### 2.1 模糊决策法

模糊决策法采用模糊数学对目标模糊的对象系统进行定量决策,可应用于模型预测控制<sup>[22-23]</sup>。

采用最大隶属度算子对标么化的成本函数模糊化,如式(13)所示。下一时刻选择电压矢量为 $\mu_D$ 最小值对应的电压矢量,如式(14)所示:

$$\mu_D = \max(\mu_{T_e}, \mu_{\psi_s}) \quad (13)$$

$$V_{opt} = \arg \min \mu_D \quad (14)$$

基于模糊决策法的永磁同步电机模型预测转矩控制仿真波形如图5~7所示,控制性能如表4所示。

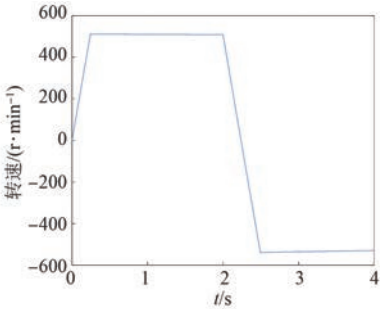


图5 基于模糊决策法的电机转速

表3 基于模糊决策法的系统性能

| $T_{rip\_RMSE}/(N \cdot m)$ | $\psi_{rip\_RMSE}/Wb$ | $f_{ave}/kHz$ |
|-----------------------------|-----------------------|---------------|
| 2.149 9                     | 0.003 5               | 4.48          |

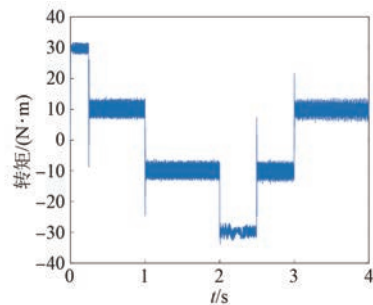


图6 基于模糊决策法的电机转矩

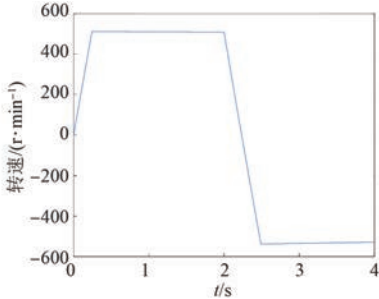


图8 基于VIKOR法的电机转速

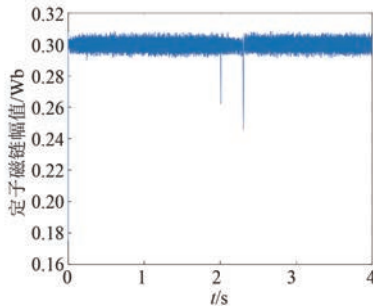


图7 基于模糊决策法的电机定子磁链幅值

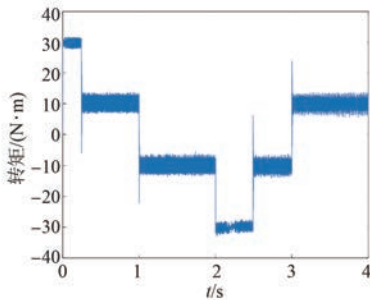


图9 基于VIKOR法的电机转矩

2.2 基于VIKOR法

多准则妥协解排序法(VIKOR)是一种多目标决策方法,其根据评估值与理想值的接近程度对排列优先顺序进行客观评价,可用于模型预测控制<sup>[24]</sup>。

基于VIKOR法的永磁同步电机模型预测转矩控制算法步骤如下。

步骤一,确定标幺化的转矩控制成本函数和磁链控制成本函数的群体效用值 $S$ 与个体遗憾值 $R$ ,如式(15)和式(16)所示:

$$S = 0.5\mu_{T_e} + 0.5\mu_{\psi_s} \tag{15}$$

$$R = \max(0.5\mu_{T_e}, 0.5\mu_{\psi_s}) \tag{16}$$

步骤二,计算折衷决策指标值 $Q$ ,如式(17)所示:

$$Q = 0.5 \frac{S - S_{\min}}{S_{\max} - S_{\min}} + 0.5 \frac{R - R_{\min}}{R_{\max} - R_{\min}} \tag{17}$$

步骤三,选择对应折衷决策指标值最小的电压矢量作为输出,如式(18)所示:

$$V_{\text{opt}} = \arg \min Q \tag{18}$$

基于VIKOR法的永磁同步电机模型预测转矩控制仿真波形如图8~10所示,控制性能如表4所示。

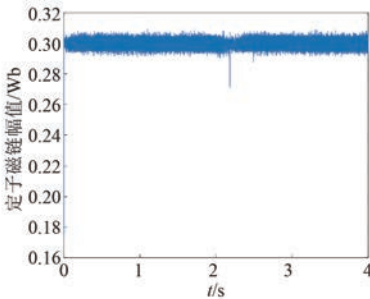


图10 基于VIKOR法的电机定子磁链幅值

表4 基于VIKOR法的系统性能

| $T_{\text{rip\_RMSE}}/(\text{N}\cdot\text{m})$ | $\psi_{\text{rip\_RMSE}}/\text{Wb}$ | $f_{\text{ave}}/\text{kHz}$ |
|------------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|
| 2.018 8                                        | 0.003 0                             | 4.42                        |

2.3 基于TOPSIS法

优劣解距离法(TOPSIS)是根据评价对象与理想目标的接近程度进行相对优劣评价的一种综合评价方法,可用于模型预测控制<sup>[25]</sup>。

基于TOPSIS法的永磁同步电机模型预测转矩控制算法步骤如下。

步骤一,寻找标幺化的转矩控制成本函数和磁链控制成本函数的最优解和最劣解。由标幺化成本函数可知, $\mu_{T_e}$ 和 $\mu_{\psi_s}$ 的最优解 $A_{T_e}^*$ 和 $A_{\psi_s}^*$ 为0,最劣解 $A_{T_e}^-$ 和 $A_{\psi_s}^-$ 为1。

步骤二,计算备选状态与最优解和最劣解之间的差距,如式(19)和(20)所示:

$$D^+ = \sqrt{(\mu_{T_e} - A_{T_e}^*)^2 + (\mu_{\psi_s} - A_{\psi_s}^*)^2} \quad (19)$$

$$D^- = \sqrt{(\mu_{T_e} - A_{T_e}^-)^2 + (\mu_{\psi_s} - A_{\psi_s}^-)^2} \quad (20)$$

步骤三,计算接近系数,如式(21)所示:

$$C = \frac{D^-}{D^+ + D^-} \quad (21)$$

步骤四,选择对应接近系数最大的电压矢量作为输出电压矢量,如式(22)所示:

$$V_{opt} = \arg \max C \quad (22)$$

基于 TOPSIS 法的永磁同步电机模型预测转矩控制仿真波形如图 11~13 所示,控制性能如表 5 所示。

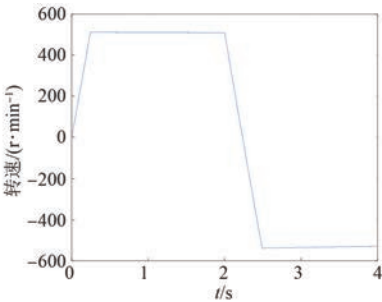


图 11 基于 TOPSIS 法的电机转速

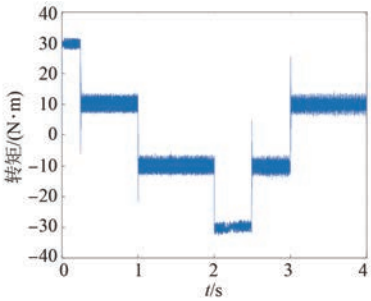


图 12 基于 TOPSIS 法的电机转矩

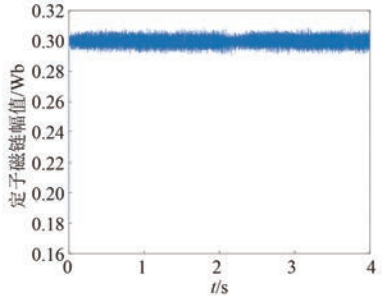


图 13 基于 TOPSIS 法的电机定子磁链幅值

表 5 基于 TOPSIS 法的系统性能

| $T_{rip\_RMSE}/(N \cdot m)$ | $\psi_{rip\_RMSE}/Wb$ | $f_{ave}/kHz$ |
|-----------------------------|-----------------------|---------------|
| 2.014 6                     | 0.002 9               | 4.48          |

2.4 基于变异系数赋权法

变异系数法是根据各项指标的信息计算得到离散程度与权重的客观赋权方法,可用于模型预测控制权重系数的设计<sup>[26]</sup>。

基于变异系数赋权法的永磁同步电机模型预测转矩控制算法步骤如下。

步骤一,计算标么化后的转矩控制和磁链控制成本函数的平均值和标准差,如式(23)~式(26)所示:

$$\bar{\mu}_{T_e} = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^7 \mu_{T_e}(i) \quad (23)$$

$$\bar{\mu}_{\psi_s} = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^7 \mu_{\psi_s}(i) \quad (24)$$

$$\sigma_{T_e} = \sqrt{\frac{1}{7} \sum_{i=1}^7 [\mu_{T_e}(i) - \bar{\mu}_{T_e}]^2} \quad (25)$$

$$\sigma_{\psi_s} = \sqrt{\frac{1}{7} \sum_{i=1}^7 [\mu_{\psi_s}(i) - \bar{\mu}_{\psi_s}]^2} \quad (26)$$

步骤二,根据平均值和标准差,计算变异系数,如式(27)和(28)所示:

$$CV_{T_e} = \frac{\sigma_{T_e}}{\bar{\mu}_{T_e}} \quad (27)$$

$$CV_{\psi_s} = \frac{\sigma_{\psi_s}}{\bar{\mu}_{\psi_s}} \quad (28)$$

步骤三,得到基于变异系数赋权法的成本函数,如式(29)所示:

$$g = CV_{T_e} \times \mu_{T_e} + CV_{\psi_s} \times \mu_{\psi_s} \quad (29)$$

基于变异系数赋权法的永磁同步电机模型预测转矩控制仿真波形如图 14~16 所示,控制性能如表 6 所示。

表 6 基于变异系数赋权法的系统性能

| $T_{rip\_RMSE}/(N \cdot m)$ | $\psi_{rip\_RMSE}/Wb$ | $f_{ave}/kHz$ |
|-----------------------------|-----------------------|---------------|
| 2.233 3                     | 0.003 0               | 4.69          |

2.5 基于熵值赋权法

熵值赋权法是通过熵值判断指标的离散程度与权重的客观评价法,可用于权重系数设计<sup>[27]</sup>。

基于熵值赋权法的永磁同步电机模型预测转

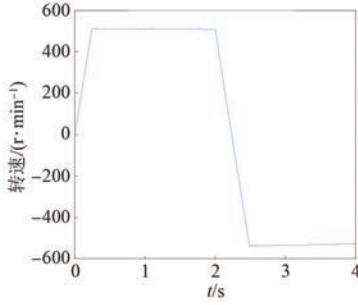


图 14 基于变异系数赋权法的电机转速

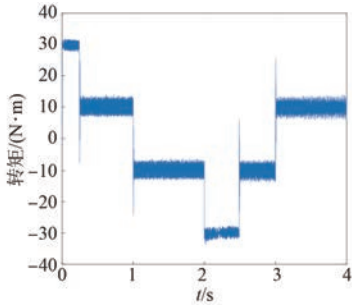


图 15 基于变异系数赋权法的电机转矩

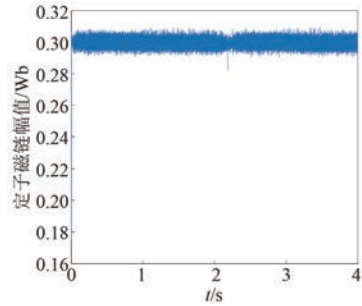


图 16 基于变异系数赋权法的电机定子磁链幅值

矩控制算法步骤如下。

步骤一, 计算标么化后的各成本函数的比值, 如式(30)和式(31)所示:

$$p_{T_e} = \frac{\mu_{T_e}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \mu_{T_e}}} \quad (30)$$

$$p_{\psi_s} = \frac{\mu_{\psi_s}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \mu_{\psi_s}}} \quad (31)$$

式中:  $m$  为备选电压矢量数目, 这里取  $m=7$ 。

步骤二, 求各指标的信息熵, 如式(32)和式(33)所示:

$$E_{T_e} = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m p_{T_e} \ln p_{T_e} \quad (32)$$

$$E_{\psi_s} = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m p_{\psi_s} \ln p_{\psi_s} \quad (33)$$

步骤四, 计算信息冗余度, 如式(34)和式(35)所示:

$$D_{T_e} = 1 - E_{T_e} \quad (34)$$

$$D_{\psi_s} = 1 - E_{\psi_s} \quad (35)$$

步骤五, 得到基于熵值赋权法的成本函数, 如式(36)所示:

$$g = D_{T_e} \mu_{T_e} + D_{\psi_s} \mu_{\psi_s} \quad (36)$$

基于熵值赋权法的永磁同步电机模型预测转矩控制仿真波形如图 17~19 所示, 控制性能如表 7 所示。

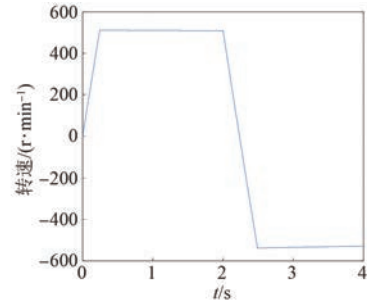


图 17 基于熵值赋权法的电机转速

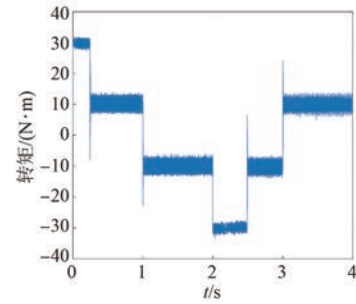


图 18 基于熵值赋权法的电机转矩

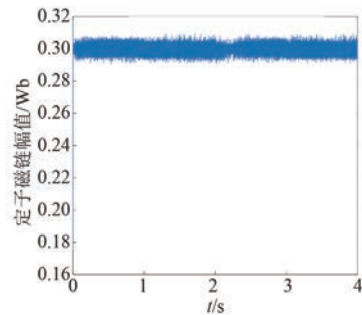


图 19 基于熵值赋权法的电机定子磁链幅值

综上, 不同控制策略下, 永磁同步电机模型预测转矩控制系统性能如表 8 所示。

表 7 基于熵值赋权法的系统性能

| $T_{rip\_RMSE}/(N \cdot m)$ | $\psi_{rip\_RMSE}/Wb$ | $f_{ave}/kHz$ |
|-----------------------------|-----------------------|---------------|
| 2.177 9                     | 0.003 0               | 4.89          |

表 8 永磁同步电机模型预测转矩控制系统性能

| 控制策略                          | $T_{rip\_RMSE}/(N \cdot m)$ | $\psi_{rip\_RMSE}/Wb$ | $f_{ave}/kHz$ |
|-------------------------------|-----------------------------|-----------------------|---------------|
| 固定权重系数<br>( $\lambda = 100$ ) | 2.120 6                     | 0.003 3               | 4.86          |
| 模糊决策法                         | 2.149 9                     | 0.003 5               | 4.48          |
| VIKOR 法                       | 2.018 8                     | 0.003 0               | 4.42          |
| TOPSIS 法                      | 2.014 6                     | 0.002 9               | 4.48          |
| 变异系数赋权法                       | 2.233 3                     | 0.003 0               | 4.69          |
| 熵值赋权法                         | 2.177 9                     | 0.003 0               | 4.83          |

对比不同策略的控制效果可知,基于客观评价的永磁同步电机模型预测转矩控制具有可行性。客观评价方法均基于标幺化的独立成本函数,模糊决策、VIKOR 和 TOPSIS 为选择折衷解,变异系数法和熵权法基于指标离散程度进行客观赋权。不同策略的控制性能存在一定的差异,但整体基本相当。由综合性能对比可知,TOPSIS 的控制性能相对最优。

3 考虑开关次数控制的客观评价法

将开关次数控制也作为控制目标之一,开关次数控制成本函数如式(37)所示:

$$g_{switching} = 2 \times [|S_a(k+1) - S_a(k)| + |S_b(k+1) - S_b(k)| + |S_c(k+1) - S_c(k)|] \tag{37}$$

式中: $S_a(k)$ 、 $S_b(k)$ 和 $S_c(k)$ 分别为当前时刻逆变器三相开关状态; $S_a(k+1)$ 、 $S_b(k+1)$ 和 $S_c(k+1)$ 分别为下一时刻施加电压矢量对应的开关状态。

由于两电平逆变器存在的开关状态是确定且有限的,每个控制周期中对应开关状态的开关切换次数也是确定的,如表 10 所示。其中零电压矢量  $V_0$  所对应的开关状态有两种,分别为 000 和 111,当前开关状态切换到  $V_0$  的开关次数根据开关次数最小化原则确定。

3.1 基于标幺化法

对表 9 中的开关次数控制成本函数进行标准化,标准化的开关次数控制成本函数  $\mu_{switching}$  如表 10 所示。

基于标幺化法的模型预测转矩控制成本函数如式(38)所示:

表 9 开关次数控制的成本函数  $g_{switching}$

| 开关状态 | $V_0$ | $V_1$ | $V_2$ | $V_3$ | $V_4$ | $V_5$ | $V_6$ |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 000  | 0     | 2     | 4     | 2     | 4     | 2     | 4     |
| 100  | 2     | 0     | 2     | 4     | 6     | 4     | 2     |
| 110  | 2     | 2     | 0     | 2     | 4     | 6     | 4     |
| 010  | 2     | 4     | 2     | 0     | 2     | 4     | 6     |
| 011  | 2     | 6     | 4     | 2     | 0     | 2     | 4     |
| 001  | 2     | 4     | 6     | 4     | 2     | 0     | 2     |

表 10 标准化的开关次数控制成本函数  $\mu_{switching}$

| 开关状态 | $V_0$ | $V_1$ | $V_2$ | $V_3$ | $V_4$ | $V_5$ | $V_6$ |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 000  | 0     | 1/2   | 1     | 1/2   | 1     | 1/2   | 1     |
| 100  | 1/3   | 0     | 1/3   | 2/3   | 1     | 2/3   | 1/3   |
| 110  | 1/3   | 1/3   | 0     | 1/3   | 2/3   | 1     | 2/3   |
| 010  | 1/3   | 2/3   | 1/3   | 0     | 1/3   | 2/3   | 1     |
| 011  | 1/3   | 1     | 2/3   | 1/3   | 0     | 1/3   | 2/3   |
| 001  | 1/3   | 2/3   | 1     | 2/3   | 1/3   | 0     | 1/3   |
| 101  | 1/3   | 1/3   | 2/3   | 1     | 2/3   | 1/3   | 0     |
| 111  | 0     | 1     | 1/2   | 1     | 1/2   | 1     | 1/2   |

$$g = \mu_{T_e} + \mu_{\psi_s} + \mu_{switching} \tag{38}$$

式中: $\mu_{switching}$  为标幺化的开关次数控制成本函数。

基于标幺化法的永磁同步电机模型预测转矩控制仿真波形如图 20~22 所示。此时,系统控制性能较差<sup>[28]</sup>。

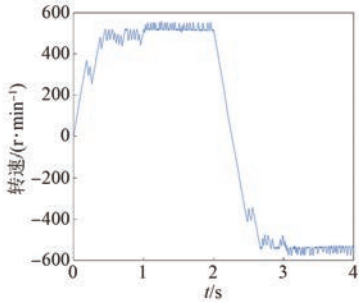


图 20 基于标幺化法的电机转速

3.2 基于模糊决策法

采用最大隶属度算子对标幺化的成本函数进行模糊化,如式(39)所示。与上文相同,模糊决策法下一时刻输出令  $\mu_D$  最小值的电压矢量即:

$$\mu_D = \max(\mu_{T_e}, \mu_{\psi_s}, \mu_{switching}) \tag{39}$$

基于模糊决策法的永磁同步电机模型预测转矩控制仿真波形如图 23~25 所示。此时,系统控制性能较差。

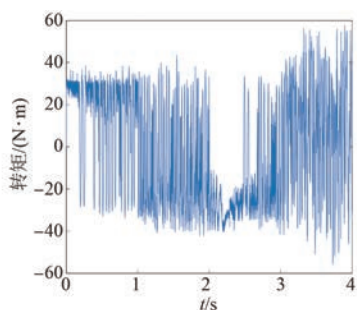


图 21 基于标么化法的电机转矩

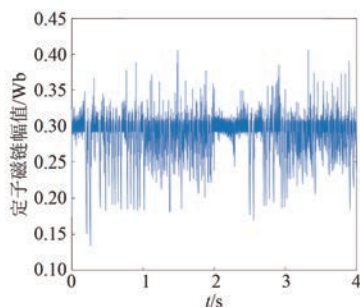


图 22 基于标么化法的电机定子磁链幅值

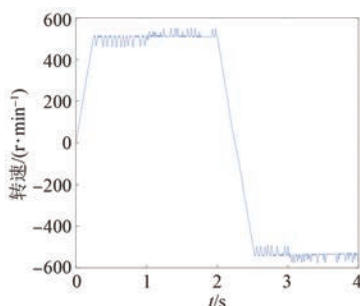


图 23 基于模糊决策法的电机转速

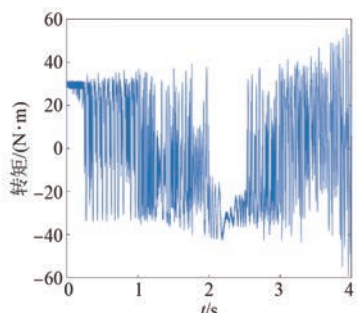


图 24 基于模糊决策法的电机转矩

### 3.3 基于 VIKOR 法

增加开关次数控制的 VIKOR 法群体效用值  $S$  与个体遗憾值  $R$  如式(40)和式(41)所示。与上文相同,VIKOR 法输出令折衷决策指标值最小的电压矢量。

— 18 —

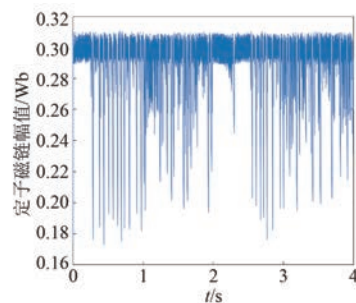


图 25 基于模糊决策法的电机定子磁链

$$S = \mu_{T_e} + \mu_{\psi_s} + \mu_{\text{switching}} \quad (40)$$

$$R = \max(\mu_{T_e}, \mu_{\psi_s}, \mu_{\text{switching}}) \quad (41)$$

基于 VIKOR 法的永磁同步电机模型预测转矩控制仿真波形如图 26~28 所示。此时,系统控制性能较差。

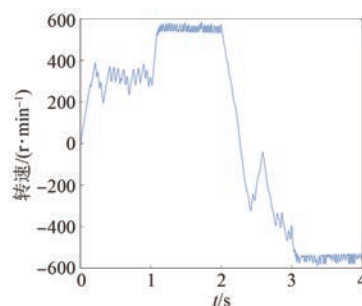


图 26 基于 VIKOR 法的电机转速

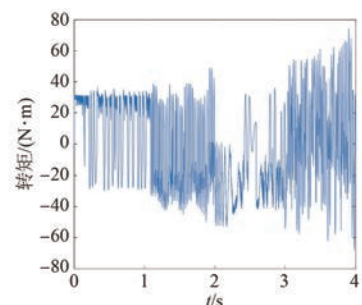


图 27 基于 VIKOR 法的电机转矩

### 3.4 基于 TOPSIS 法

增加开关次数控制的 TOPSIS 法备选状态与最优解和最劣解之间的差距,如式(42)和式(43)所示。与上文相同,TOPSIS 法输出令接近系数最大的电压矢量。

$$D^+ = \sqrt{(\mu_{T_e} - A_{T_e}^*)^2 + (\mu_{\psi_s} - A_{\psi_s}^*)^2 + (\mu_{\text{switching}} - A_{\text{switching}}^*)^2} \quad (42)$$

$$D^- =$$

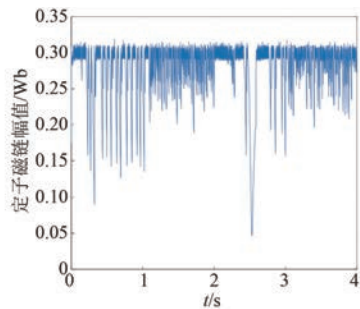


图 28 基于 VIKOR 法的电机定子磁链幅值

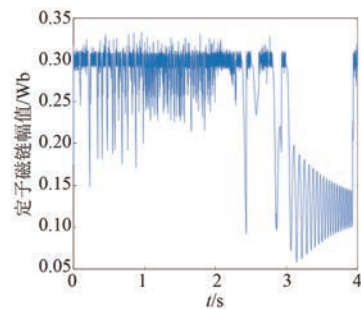


图 31 基于 TOPSIS 法的电机定子磁链幅值

$$\sqrt{(\mu_{T_e} - A_{T_e}^-)^2 + (\mu_{\psi_s} - A_{\psi_s}^-)^2 + (\mu_{\text{switching}} - A_{\text{switching}}^-)^2} \quad (43)$$

式中： $A_{\text{switching}}^*$  和  $A_{\text{switching}}^-$  为  $\mu_{\text{switching}}$  的最优解和最劣解，分别为 0 和 1。

基于 TOPSIS 法的永磁同步电机模型预测转矩控制仿真波形如图 29~31 所示。此时，系统控制性能较差。

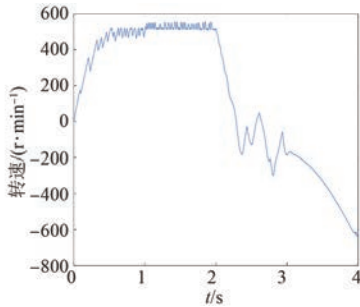


图 29 基于 TOPSIS 法的电机转速

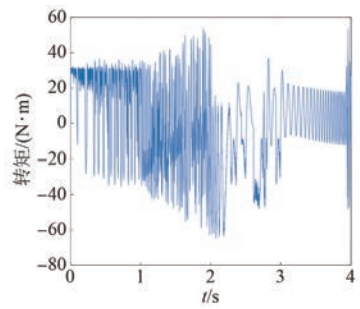


图 30 基于 TOPSIS 法的电机转矩

3.5 基于变异系数赋权法

标幺化的开关次数控制成本函数的平均值、标准差和变异系数如表 11 所示。

基于变异系数权重系数设计的成本函数如式 (44) 所示：

$$g = CV_{T_e} \times \mu_{T_e} + CV_{\psi_s} \times \mu_{\psi_s} + CV_{\text{switching}} \times \mu_{\text{switching}} \quad (44)$$

式中： $CV_{\text{switching}}$  为开关次数控制成本函数的变异系数。

表 11 开关次数控制成本函数平均值、标准差和变异系数

| 开关状态 | 平均值     | 标准差     | 变异系数    |
|------|---------|---------|---------|
| 000  | 0.642 9 | 0.349 9 | 0.544 3 |
| 100  | 0.476 2 | 0.301 2 | 0.632 5 |
| 110  | 0.476 2 | 0.301 2 | 0.632 5 |
| 010  | 0.476 2 | 0.301 2 | 0.632 5 |
| 011  | 0.476 2 | 0.301 2 | 0.632 5 |
| 001  | 0.476 2 | 0.301 2 | 0.632 5 |
| 101  | 0.476 2 | 0.301 2 | 0.632 5 |
| 111  | 0.642 9 | 0.349 9 | 0.544 3 |

基于变异系数赋权法的永磁同步电机模型预测转矩控制仿真波形如图 32~34 所示。此时，系统控制性能较差。

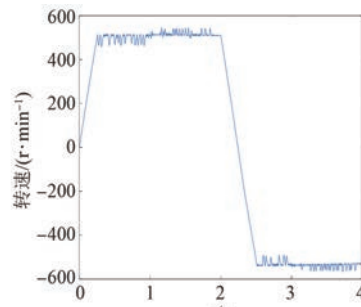


图 32 基于变异系数赋权法的电机转速

3.6 基于熵值赋权法

基于熵值赋权法的成本函数如式 (45) 所示：

$$g = D_{T_e} \mu_{T_e} + D_{\psi_s} \mu_{\psi_s} + D_{\text{switching}} \mu_{\text{switching}} \quad (45)$$

式中： $D_{\text{switching}}$  为开关次数控制成本函数的信息冗余度。

基于熵值赋权法的永磁同步电机模型预测转矩控制仿真波形如图 35~37 所示。此时，系统控制性能较差。

由仿真结果可知，当控制目标为磁链、转矩和

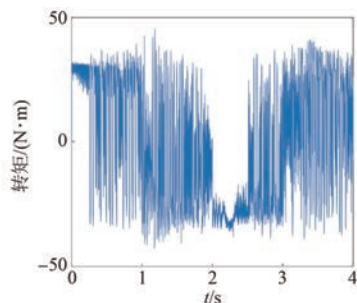


图 33 基于变异系数赋权法的电机转矩

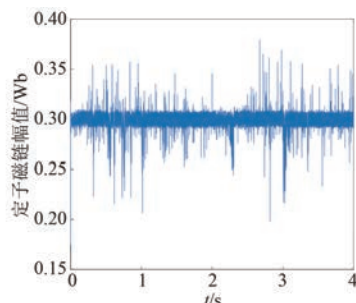


图 37 基于熵值赋权法的电机定子磁链幅值

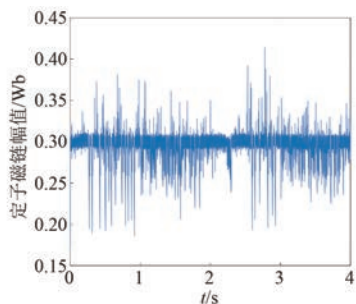


图 34 基于变异系数赋权法的电机定子磁链幅值

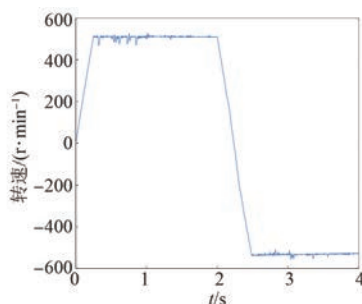


图 35 基于熵值赋权法的电机转速

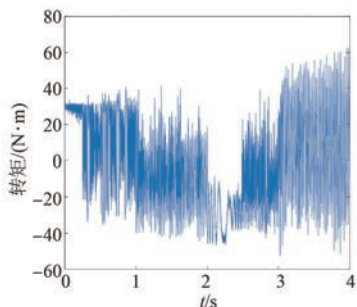


图 36 基于熵值赋权法的电机转矩

开关次数时,模糊决策法、VIKOR 法、TOPSIS 法的电机系统控制性能较差<sup>[29-30]</sup>。变异系数赋权法和熵值赋权法基于离散程度对成本函数进行赋权,但指标离散程度与控制目标的重要性并不等价,无法改善系统控制性能。

## 4 结 语

对于仅考虑磁链和转矩控制的永磁同步电机模型预测转矩控制,模糊决策法、VIKOR 法、TOPSIS 法、变异系数赋权法和熵值赋权法等客观评价法是可行的,无需权重系数,但在一定程度上增加计算负担。不同策略的控制性能存在一定的差异,但整体基本相当。由综合性能对比可知, TOPSIS 法的控制性能相对最优。当控制目标增加开关次数控制,控制目标重要性并不相同,客观评价方法效果并不明显。

## 【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] RODRIGUEZ J, GARICA C, MORA A, et al. Latest advances of model predictive control in electrical drives-part II: applications and benchmarking with classical control methods [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(5): 5047-5061.
- [3] 王治国, 郑泽东, 李永东. 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.
- [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.
- [5] 李耀华, 刘子焜, 刘东梅, 等. 永磁同步电机直接转矩控制与模型预测转矩控制比较研究[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(7): 18-25.
- [6] PETROS K, TOBIS G. Guidelines for the design of finite control set model predictive controller [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(7): 7434-7450.

- [ 7 ] 李耀华, 秦辉, 苏锦仕, 等. 表贴式永磁同步电机有限集 MPTC 成本函数研究[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(9): 12-18.
- [ 8 ] CORTES P, KOUROS, 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, 2009.
- [ 9 ] RODRIGUEZ J, CORTES P. 功率变换器和电气传动的预测控制[M]. 陈一民, 周京华, 卫三民, 等. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- [ 10 ] 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.
- [ 11 ] 李耀华, 秦辉, 苏锦仕, 等. 基于模糊控制的动态权重系数表贴式永磁同步电机模型预测转矩控制系统[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(3): 1-7.
- [ 12 ] 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.
- [ 13 ] 史涔潏, 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.
- [ 14 ] 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.
- [ 15 ] 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.
- [ 16 ] 李耀华, 陈桂鑫, 王孝宇, 等. 表贴式永磁同步电机模型预测转矩控制系统预测模型研究[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(1): 16-21.
- [ 17 ] ROJAS C A, RODRIGUEZ J, VILLARROEL F, et al. Predictive torque and flux control without weighting factors [ J ]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(2): 681-690.
- [ 18 ] 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.
- [ 19 ] 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.
- [ 20 ] 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.
- [ 21 ] 郭磊磊, 孙怡舒, 李琰琰, 等. PMSM 无权重系数转矩预测控制方法[J]. 太阳能学报, 2021, 42(8): 426-433.
- [ 22 ] VILLARROEL F, ESPINOZA R J, ROJAS A C, et al. Multiobjective switching state selector for finite-states model predictive control based on fuzzy decision making in a matrix converter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(2): 589-599.
- [ 23 ] FARAH N, LEI G, ZHU J, et al. Two-vector dimensionless model predictive control of PMSM drives based on fuzzy decision making [ J ]. CES Transactions on Electrical Machines and Systems, 2022, 6(4): 393-403.
- [ 24 ] MUDDINENI P V, BONALN K A, SANDEPUDI R S. Enhanced weighting factor selection for predictive torque control of induction motor drive based on VIKOR method [ J ]. IET Electric Power Applications, 2016, 10(9): 877-888.
- [ 25 ] MUDDINENI P V, SANDEPUDI R S, BONALN K A. Finite control set predictive torque control for induction motor drive with simplified weighting factor selection using TOPSIS method [ J ]. IET Electric Power Applications, 2017, 11(5): 749-760.
- [ 26 ] BHOWATE A, AWARE M, SHARMA S. Predictive torque control with online weighting factor computation technique to improve performance of induction motor drive in low speed region[J]. IEEE Access, 2019(7): 42309-42321.
- [ 27 ] 姜顺明, 王奕轩, 吴朋朋. 车辆变权重多目标自适应巡航控制[J]. 重庆理工大学学报, 2022, 36(6): 23-32.
- [ 28 ] 李耀华, 张鑫泉, 崔康东, 等. 永磁同步电机标幺化无权重系数模型预测转矩控制[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(12): 7-12.
- [ 29 ] 俞立平. 客观赋权法本质及在科技评价中的应用研究-以学术期刊为例[J]. 情报理论与实践, 2021, 44(2): 50-56.
- [ 30 ] 俞立平, 郑昆. 期刊评价中不同客观赋权法权重比较及其思考[J]. 现代情报, 2021, 41(12): 121-130.