

永磁同步电机标幺化无权重系数模型 预测转矩控制*

李耀华, 张鑫泉, 崔康东, 陈 昕, 徐志雄, 兰奋龙
(长安大学 汽车学院, 陕西 西安 710064)

摘 要: 针对永磁同步电机模型预测转矩控制权重系数设计和调节的问题, 采用标幺化成本函数将控制目标转换为无量纲的变量, 从而消除权重系数, 仿真验证其有效性。研究指出标幺化成本函数统一控制目标的变化范围, 仅适用于所有控制目标重要性基本相同的领域, 并且计算量大, 算法实时性降低。

关键词: 永磁同步电机; 模型预测转矩控制; 权重系数; 标幺化

中图分类号: TM351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2022)12-0007-06

doi: 10.12177/emca.2022.127

Model Predictive Torque Control for Permanent Magnet Synchronous Motor with Pre-Unit Unweighting Factor*

LI Yaohua, ZHANG Xinquan, CUI Kangjian, CHEN Xin, XU Zhixiong, LAN Fenlong
(School of Automotive, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: Aiming at the problem of weighting factor design and adjustment of model predictive torque control (MPTC) of permanent magnet synchronous motor (PMSM), the pre-unit cost function is used to transfer the control objects into dimensionless variables, so as to eliminate the weighting factor, and its effectiveness is verified by simulation. Studies show that the pre-unit cost function unifies the range of control objects, and it can only be used in the area where the importance of all control objects is almost the same, and its computational load is large, and its real-time performance of the algorithm is reduced.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); model predictive torque control (MPTC); weighting factor; per-unit

0 引 言

模型预测转矩控制(MPTC)性能优越, 可用于线性或非线性的控制对象, 采用成本函数即可轻易实现多目标控制和非线性环节, 近年来在永磁同步电机(PMSM)控制领域得到高度关注^[1-5]。

成本函数作为评价备选电压矢量控制性能的方法, 可以统一多控制目标, 实现多目标优化控制。当控制目标为同一量纲, 可直接相加, 如模型预测电流控制中的定子电流 d 、 q 轴分量。但如果

控制目标的量纲并不相同, 则需设置权重系数, 如MPTC中的磁链和转矩。但是成本函数灵活柔性的特点也带来了权重系数的设计与调整问题。权重系数大多采用试验法确定, 过程相对繁琐^[6]。文献[7-9]采用模糊控制动态设定权重系数, 但模糊控制规则的设计较为复杂。文献[10-12]采用粒子群算法和神经网络算法实现权重系数的自整定, 但需要构造大量训练数据集, 计算量较大。文献[13-14]将不同控制变量转换为各自成本函数的排序位次, 从而消除量纲, 无需权重系数, 但

收稿日期: 2022-06-28; 收到修改稿日期: 2022-10-08

* 基金项目: 陕西省自然科学基金项目(2021JM-163); 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。

将成本函数寻最优转换为排序,增加了排序计算量。文献[15-16]将磁链和转矩转换为相对误差率,从而统一量纲,消除权重系数,但如果控制目标的参考值不确定,则该方法失效,仍需设计权重系数。文献[17-18]提出将磁链和转矩标么化以消除量纲,从而消除无权重系数。

本文建立基于标么化成本函数的表面式 PMSM MPTC,仿真验证其有效性,并指出标么化成本函数统一控制目标的变化范围,仅适用于控制目标重要性基本相同的领域,且算法实时性有所降低。

1 PMSM MPTC

定子坐标系下,表面式 PMSM 定子磁链矢量与转矩预测模型如下所示:

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

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

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; V_s 为施加电压矢量幅值; α 为施加电压矢量与定子磁链的夹角^[19]; p 为极对数; T_s 为采样时间; ψ_f 为转子磁链。

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,具体选择以开关次数最小为原则^[20]。

$$V_s \in \{V_0, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6\} \quad (3)$$

定义成本函数如下所示:

$$g = \left| \frac{T_e(k+1) - T_e^*}{T_e^*} \right| + \left| \frac{\psi_s(k+1) - \psi_s^*}{\psi_s^*} \right| \quad (4)$$

式中: T_e^* 和 ψ_s^* 分别为转矩参考值和磁链参考值。

PMSM 模型预测转矩系统框图如图 1 所示。

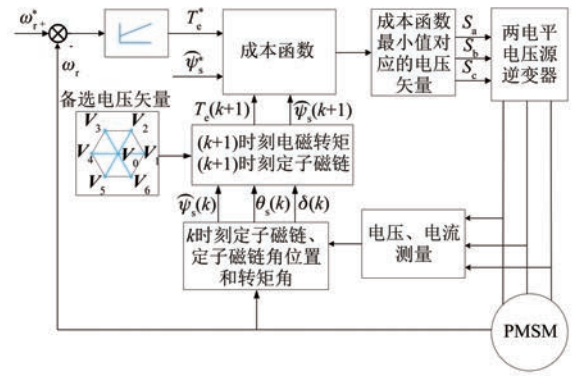


图 1 PMSM 模型预测转矩系统

在 MATLAB/Simulink 中建立基于定子坐标系的表面式 PMSM MPTC 仿真模型,成本函数如式(1)所示。仿真模型为离散模型,采样时间为 5×10^{-5} s,直流母线电压为 312 V,初始参考转速为 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。PMSM MPTC 系统仿真参数如表 1 所示。电机系统仿真波形如图 2~图 5 所示。

表 1 仿真系统参数

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
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 $(\text{N} \cdot \text{m})$	$[-30, 30]$

定义转矩脉动均方根误差(RMSE)、磁链脉动 RMSE 和平均开关频率如下所示:

$$T_{\text{rip_RMSE}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_e - T_e^*)^2}{n}} \quad (5)$$

$$\psi_{\text{rip_RMSE}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\psi_s - \psi_s^*)^2}{n}} \quad (6)$$

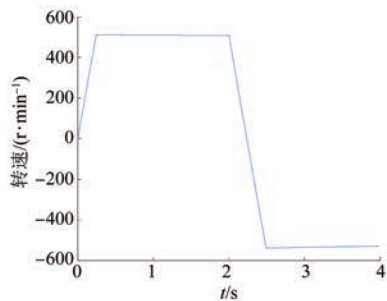


图2 PMSM 转速

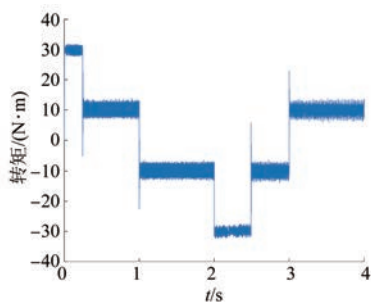


图3 PMSM 转矩

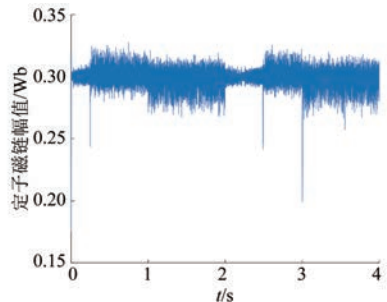


图4 PMSM 定子磁链幅值

$$f_{ave} = \frac{N_{switching}}{6 \times t} \tag{7}$$

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。

基于式(4)所示的 PMSM MPTC 系统性能如表 2 所示。

表 2 PMSM MPTC 系统性能		
$T_{rip_RMSE}/(N \cdot m)$	ψ_{rip_RMSE}/Wb	f_{ave}/kHz
1.790 2	0.006 4	5.41

2 标幺化无权重系数成本函数

式(4)所示的成本函数将转矩误差和磁链误

差转换为误差率,从而统一量纲,但需要转矩和磁链参考值,对于开关次数控制等没有参考值的控制目标,误差率成本函数失效。标幺化法将转矩控制误差和磁链控制误差统一转换为无量纲的标幺值,无需参考值,应用范围广。定义转矩控制和磁链控制的成本函数分别如下所示:

$$g_{T_e} = |T_e^* - T_e(k+1)| \tag{8}$$

$$g_{\psi_s} = |\psi_s^* - \psi_s(k+1)| \tag{9}$$

令 g_{T_e} 和 g_{ψ_s} 最大值与最小值分别为 $g_{T_{e_max}}$ 、 $g_{T_{e_min}}$ 、 $g_{\psi_{s_max}}$ 、 $g_{\psi_{s_min}}$,则标幺化的 $g_{T_{e_per-unit}}$ 和 $g_{\psi_{s_per-unit}}$ 如下所示:

$$g_{T_{e_per-unit}} = \frac{g_{T_e} - g_{T_{e_min}}}{g_{T_{e_max}} - g_{T_{e_min}}} \tag{10}$$

$$g_{\psi_{s_per-unit}} = \frac{g_{\psi_s} - g_{\psi_{s_min}}}{g_{\psi_{s_max}} - g_{\psi_{s_min}}} \tag{11}$$

由式(10)和式(11)可知,标幺化 $g_{T_{e_per-unit}}$ 和 $g_{\psi_{s_per-unit}}$ 为同一数量级无量纲变量,变化范围均为 $[0,1]$,可消除成本函数中的权重系数,如式(12)所示:

$$g = g_{T_{e_per-unit}} + g_{\psi_{s_per-unit}} \tag{12}$$

基于上文仿真模型,采用标幺化成本函数,电机系统仿真波形如图 5~图 7 所示,控制性能如表 3 所示。

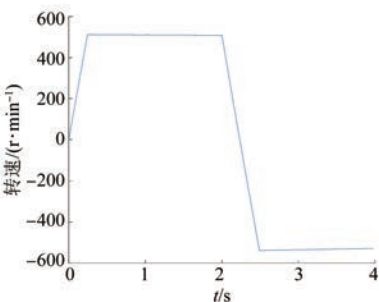


图5 PMSM 转速

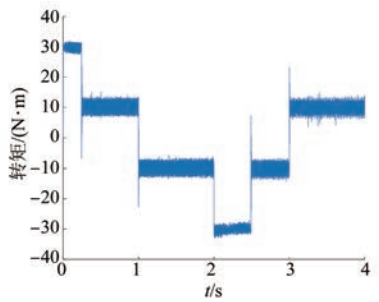


图6 PMSM 转矩

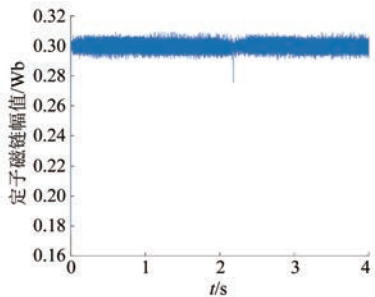


图7 PMSM 定子磁链幅值

表3 PMSM MPTC 系统性能

$T_{rip_RMSE}/(N \cdot m)$	ψ_{rip_RMSE}/Wb	f_{ave}/kHz
2.038 0	0.003 0	4.57

仿真结果表明,标幺化成本函数无需权重系数,此时电机可实现四象限运行,且运行良好。与误差率成本函数仿真结果对比可知,标幺化成本函数使转矩控制和磁链控制的重要性相同,弱化转矩控制,强化磁链控制,使转矩脉动增大,磁链脉动减小。

3 实时性验证

基于误差率成本函数的 PMSM MPTC 计算量为遍历电压矢量计算下一时刻转矩 7 次,计算转矩误差率绝对值 7 次,遍历电压矢量计算下一时刻磁链 7 次,计算磁链误差率绝对值 7 次,计算成本函数 7 次,7 个成本函数寻最小计算 1 次。基于标幺化成本函数的 PMSM MPTC 计算量为遍历电压矢量计算下一时刻转矩 7 次,计算转矩误差绝对值 7 次,7 个转矩误差绝对值寻最小计算 1 次,寻最大计算 1 次,转矩标幺化计算 7 次,遍历电压矢量计算下一时刻磁链 7 次,计算磁链误差绝对值 7 次,7 个磁链误差绝对值寻最小计算 1 次,寻最大计算 1 次,磁链标幺化计算 7 次,成本函数计算 7 次,7 个成本函数寻最小计算 1 次。

标幺化无权重系数 MPTC 额外增加 7 个转矩误差绝对值寻最小计算 1 次,寻最大计算 1 次,转矩标幺化计算 7 次,7 个磁链误差绝对值寻最小计算 1 次,寻最大计算 1 次,磁链标幺化计算 7 次。

基于 STM32 单片机平台,对不同成本函数的

MPTC 进行单步实时性验证。单片机实时性验证的输入数据来自仿真数据,如表 4 所示。

表4 单片机实时性验证输入数据

参数名称	参数值
当前时刻定子磁链幅值 $\psi_s(k)/Wb$	0.298 6
当前时刻定子磁链角度 $\theta_s(k)/(^{\circ})$	65.002 7
当前时刻转矩角 $\delta(k)/(^{\circ})$	16.848 5

将单步算法循环 80 000 次,共进行 10 组实时试验,并计算其平均值。基于误差率和标幺化成本函数的 PMSM MPTC 的单步平均计算耗时如表 5 所示。

表5 平均计算耗时

成本函数	平均耗时/ μs
式(4)	36.111
式(12)	49.937

由表 5 可知,标幺化成本函数增大了计算量,相比于误差率成本函数,其平均计算耗时增加 38.29%。

4 考虑开关次数控制的标幺化无权重系数成本函数

将开关次数控制引入 PMSM MPTC,则控制目标增加为 3 个。此时,误差率成本函数失效,标幺化成本函数依然有效。标幺化的开关次数控制成本函数如下所示:

$$g_{switching} = \frac{N - N_{min}}{N_{max} - N_{min}} \tag{13}$$

式中: N 为开关切换次数; N_{max} 与 N_{min} 为由当前开关状态切换到下一时刻的开关切换次数最大值与最小值。

由此可得,考虑开关次数控制的标幺化无权重系数成本函数如下所示:

$$g = g_{T_{e_per-unit}} + g_{\psi_{s_per-unit}} + g_{switching} \tag{14}$$

由于两电平电压源逆变器开关状态确定且有限,每个控制周期的开关切换次数也是确定的,如表 6 所示。

由表 4 和式(13)可知,开关切换次数的成本函数 $g_{switching}$ 也为固定值,如表 7 所示。

表 6 开关切换次数表

当前开关状态	下一时刻施加电压矢量						
	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
101	2	2	4	6	4	2	0
111	0	4	2	4	2	4	2

表 7 开关切换次数的成本函数 $g_{\text{switching}}$

当前开关状态	下一时刻施加电压矢量						
	V_0	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6
000	0	0.5	1	0.5	1	0.5	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	0.5	1	0.5	1	0.5

基于上文仿真模型,采用标幺化成本函数,电机系统仿真波形如图 8~图 10 所示,控制性能如表 8 所示。

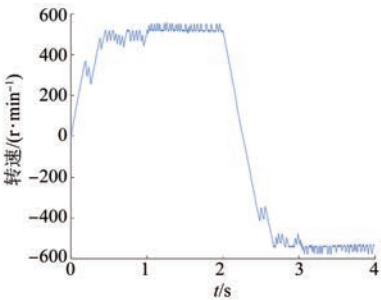


图 8 PMSM 转速

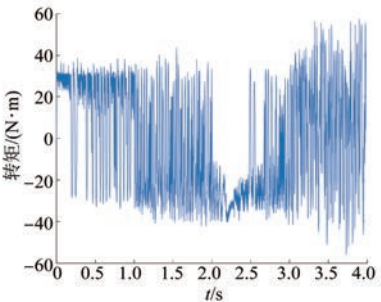


图 9 PMSM 转矩

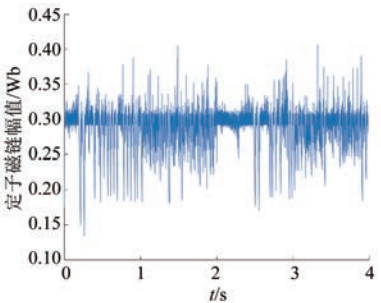


图 10 PMSM 定子磁链幅值

表 8 PMSM MPTC 系统性能

$T_{\text{rip_RMSE}}/(\text{N}\cdot\text{m})$	$\psi_{\text{rip_RMSE}}/\text{Wb}$	$f_{\text{ave}}/\text{kHz}$
29.204 2	0.030 0	0.79

仿真结果表明,此时开关频率较低,但转矩和磁链脉动极大。这是由于标幺化成本函数在统一量纲、消除权重系数的同时,也统一了磁链、转矩和开关次数三者的数量级,使得三者的控制重要性相同。但实际电机系统的重要性排序为转矩控制>磁链控制>开关次数控制。因此,标幺化成本函数弱化转矩控制和磁链控制,产生较大的转矩和磁链脉动。为了解决上述问题,需要降低开关切换次数的重要性,对 $g_{\text{switching}}$ 一项增加权重系数 λ ,如下所示:

$$g = g_{T_{\text{e_per-unit}}} + g_{\psi_{\text{s_per-unit}}} + \lambda \cdot g_{\text{switching}} \quad (15)$$

式中: λ 变化范围为 $[0,1]$ 。

基于式(15)所示的成本函数,在不同权重系数下的 PMSM MPTC 系统性能如表 9 所示。

表 9 PMSM MPTC 系统性能

λ	$T_{\text{rip_RMSE}}/(\text{N}\cdot\text{m})$	$\psi_{\text{rip_RMSE}}/\text{Wb}$	$f_{\text{ave}}/\text{kHz}$
0	2.038 0	0.003 0	4.57
0.1	2.480 0	0.003 1	4.09
0.3	6.186 6	0.003 6	3.10
0.5	12.548 1	0.006 3	2.41
1.0	29.204 2	0.030 0	0.79

表 9 说明可通过增加开关次数控制的权重系数来减小转矩和磁链脉动,但这又引入权重系数。

5 结 语

标幺化成本函数在消除控制变量量纲的同时,也统一了控制变量的变化范围,所有控制目标

的重要性均相同。对于 MPTC 的转矩控制和磁链控制,标幺化成本函数方法有效,电机系统运行正常,但其强化磁链控制,弱化转矩控制,使得转矩脉动有所增大。且标幺化成本函数增加计算量,算法实时性有所降低。

当控制目标含重要性较弱的开关次数控制时,标幺化成本函数使控制目标的重要性完全一致,电机系统过多考虑开关次数控制,电机控制性能下降。因此,标幺化成本函数仅适用于所有控制目标重要性基本相同的领域。可通过增加开关次数控制的权重系数来减小转矩和磁链脉动,但需要设计和调整权重系数。

【参考文献】

- [1] KOURO S, PEREZ M A, RODRIGUEZ J, et al. Model predictive control: MPC's role in the evolution of power electronics[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 9(4): 8.
- [2] 柳志飞, 杜贵平, 杜发达. 有限集模型预测控制在电力电子系统中的研究现状和发展趋势[J]. 电工技术学报, 2017, 32(22): 58.
- [3] 齐昕, 苏涛, 周珂, 等. 交流电机模型预测控制策略发展概述[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(18): 6408.
- [4] 杨义, 韩金刚, 陈昊, 等. 永磁同步电机的模型预测控制研究[J]. 电源学报, 2015, 13(4): 58.
- [5] 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.
- [6] 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, 2009.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 史涔澈, 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.
- [10] DRAGICEVIC T, NOVAK M. 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.
- [11] 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.
- [12] 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(4): 86.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 李耀华, 秦辉, 苏锦仕, 等. 表贴式永磁同步电机有限集模型预测转矩控制成本函数研究[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(9): 12.
- [16] 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.
- [17] 郭磊磊, 章凯旋, 王华清, 等. 一种永磁同步电机无权重因子预测转矩控制方法[J]. 轻工学报, 2019, 34(6): 80.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 李耀华, 杨启东, 曲亚飞, 等. 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.