

# 基于 CNN 的 MPTC 与 DTC 自适应切换的表贴式永磁同步电机控制策略<sup>\*</sup>

李耀华<sup>1</sup>, 刘东梅<sup>1</sup>, 赵承辉<sup>2</sup>, 刘子焜<sup>1</sup>, 王孝宇<sup>1</sup>, 陈桂鑫<sup>1</sup>

(1. 长安大学 汽车学院, 陕西 西安 710064; 2. 中国重型汽车集团有限公司, 山东 济南 250102)

**摘要:** 针对表贴式永磁同步电机(PMSM)模型预测转矩控制(MPTC)计算复杂的问题,训练卷积神经网络(CNN)以替代MPTC实现电压矢量的选择。仿真结果表明基于CNN的MPTC稳态性能与传统MPTC基本相当,但由于稳态和动态数据不平衡,使得基于CNN的MPTC动态下磁链脉动较大。因此,提出根据系统状态将基于CNN的MPTC与直接转矩控制(DTC)自适应切换使用的策略。仿真结果表明,该策略在保证稳态控制性能的同时可以有效抑制动态下磁链脉动。

**关键词:** 永磁同步电机; 模型预测控制; 卷积神经网络; 直接转矩控制

中图分类号: TM301.2 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2022)05-0008-06

doi: 10.12177/emca.2022.013

## Adaptive Switching Control Strategy Between MPTC Based on CNN and DTC for Surface-Mounted PMSM<sup>\*</sup>

LI Yaohua<sup>1</sup>, LIU Dongmei<sup>1</sup>, ZHAO Chenghui<sup>2</sup>, LIU Zikun<sup>1</sup>, WANG Xiaoyu<sup>1</sup>, CHEN Guixin<sup>1</sup>

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

2. China National Heavy Duty Truck Group Co., Ltd., Jinan 250102, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of large calculation of model predictive torque control (MPTC) for surface-mounted permanent magnet synchronous motor (PMSM), the convolutional neural network (CNN) is used to replace the MPTC for selecting voltage vector among candidate voltage vectors. Simulation results show that the steady-state control performances of the MPTC based on CNN are basically equivalent to those of the conventional MPTC. But the imbalance between the training data at steady and dynamic states deteriorates the control of the MPTC based on CNN at dynamic state and results in large stator flux ripple. Therefore, the adaptive switching strategy between the MPTC based on CNN and the direct torque control (DTC) is proposed, with the state of the system as the switching criterion. Simulation results show that the adaptive switching strategy can achieve high steady-state performance and suppress stator flux ripple at the dynamic state.

**Key words:** permanent magnet synchronous motor (PMSM); model predictive control; convolutional neural network (CNN); direct torque control (DTC)

## 0 引言

永磁同步电机(PMSM)模型预测转矩控制(MPTC)基于电机磁链和转矩预测模型,遍历逆

变器所有电压矢量,计算下一时刻的电机磁链和转矩值,并根据成本函数选择最优电压矢量。MPTC定量评估电压矢量控制效果并选择最优值,控制性能优越,同时成本函数柔性灵活,易于

收稿日期: 2022-02-23; 收到修改稿日期: 2022-04-10

\*基金项目: 陕西省自然科学基金项目(2021JM-163)

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。

实现多目标控制和非线性环节,近年来成为PMSM控制领域的研究热点之一<sup>[1-4]</sup>。但MPTC需要将所有电压矢量遍历代入至预测模型计算下一时刻预测值,计算量较大。文献[5]舍弃部分预测价值较小的电压矢量来减少备选电压矢量数目。文献[6]采用简化的预测模型来预测计算的复杂度。文献[7]从硬件角度出发采用多核并行计算架构来提升实时性。

神经网络通过对数据的学习和训练可充分逼近复杂的非线性映射关系,将所有定量或定性的信息分布储存于网络的各神经元中,具有快速大量运算的能力和线上推理速度,可满足实时性要求<sup>[8-9]</sup>。MPTC根据成本函数从备选电压矢量中选择最优电压矢量,本质上是一个非线性映射下的多分类。因此,可训练神经网络模型来学习并取代MPTC的分类规律。由于电机系统大多处于稳态状态,网络训练的数据基本以稳态数据为主,反映动态过程的数据较少,稳态数据和动态数据失衡,导致神经网络更倾向于稳态分类规律<sup>[10-11]</sup>。当电机系统处于动态时,控制性能下降,甚至有失控的风险。文献[12]通过扩充动态数据,使得动态数据和稳态数据达到平衡,但由于电机动态响应快,动态数据收集的工作量较大。文献[13]将直接转矩控制(DTC)与神经网络选择的电压矢量作为2个备选电压矢量,再利用MPTC选择最优电压矢量,但这增加了MPTC的计算量。

本文建立基于卷积神经网络(CNN)的MPTC,并针对动态下CNN控制性能下降的问题,提出根据系统状态在基于CNN的MPTC和DTC之间自适应切换的策略。仿真结果表明基于CNN的MPTC与传统MPTC性能基本相当,自适应切换策略可在保证稳态控制性能的同时改善动态控制性能,有效抑制动态下磁链脉动。

## 1 基于 CNN 的 MPTC

### 1.1 表贴式 PMSM 的 MPTC

定子磁链坐标系下,表贴式永磁同步电机(SPMMSM)的定子磁链和转矩预测模型为

$$\begin{aligned}\psi_s(k+1) &= \psi_s(k) \sqrt{1 + q^2 + 2q\cos\alpha}, \\ q &= \frac{V_s(k) \cdot \Delta t}{\psi_s(k)}\end{aligned}\quad (1)$$

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

式中: $\psi_s(k)$  和  $\psi_s(k+1)$  为  $k$  和  $k+1$  时刻定子磁链幅值; $V_s(k)$  为施加电压矢量幅值; $\alpha$  为施加电压矢量与定子磁链的夹角; $\Delta t$  为采样时间; $\delta(k)$  为  $k$  时刻转矩角; $p$  为电机极对数; $\psi_f$  为永磁体磁链; $L_d$  为  $d$  轴电感。

MPTC的成本函数为

$$g = \sqrt{\left[ \frac{T_e(k+1) - T_e^*(k)}{T_e^*(k)} \right]^2 + \left[ \frac{\psi_s(k+1) - \psi_s^*(k)}{\psi_s^*(k)} \right]^2} \quad (3)$$

式中: $\psi_s^*(k)$  和  $T_e^*(k)$  分别为  $k$  时刻定子磁链和电机转矩的参考值。

MPTC的备选电压矢量为

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

式中: $V_s$  为备选电压矢量; $V_0 \sim V_6$  为逆变器产生的7个基本电压矢量,其中零电压矢量可由2个开关状态(111或000)生成,具体选择以开关次数最小为原则<sup>[14]</sup>。

MPTC将7个电压矢量代入至磁链和转矩预测模型,基于预测结果求解得到7个成本函数,并选择令成本函数最小的电压矢量作为输出电压矢量。因此,可将其视为非线性映射下的多分类任务,从而训练神经网络以逼近分类规律。

### 1.2 特征工程与训练数据集建立

根据磁链和转矩预测模型及成本函数,选择当前  $k$  时刻的转速差、参考转矩、定子磁链幅值、定子磁链幅值误差、转矩角和定子磁链角位置等6个变量作为网络的特征输入,网络的输出即为式(4)所示的7个基本电压矢量之一。

基于 MATLAB/Simulink 建立 SPMMSM MPTC 仿真模型系统,用于神经网络训练数据集的建立和收集。仿真模型为离散模型,采样周期为  $5 \times 10^{-5}$  s。直流母线电压为 312 V,转速 PI 调节器参数为  $K_p = 5, K_i = 100$ , PI 调节器输出上下限为  $[-35 \text{ N}\cdot\text{m}, 35 \text{ N}\cdot\text{m}]$ 。仿真用 SPMMSM 参数如表 1 所示。

表 1 仿真用 SPMSM 参数

参数名称	参数值
定子电阻/ $\Omega$	0.2
$d$ 轴电感/ $H$	0.0085
$q$ 轴电感/ $H$	0.0085
转子磁链/ $Wb$	0.175
极对数	4
转动惯量/ $(kg \cdot m^2)$	0.089
黏滞阻尼/ $(N \cdot m \cdot s)$	0.005

训练集建立条件设置如下:参考定子磁链幅值为 0.3 Wb。参考转速分别为 -60、-30、-10、10、30、60 r/min, 使用斜坡函数设置负载转矩在 1 s 时间内从 -34 N·m 变化到 -10 N·m 以及 1 s 时间内从 10 N·m 变化到 34 N·m; 负载转矩分别为 -34、-30、-25、-20、-15、-10、10、15、20、25、30、34 N·m, 使用斜坡函数设置参考转速在 1 s 时间内从 -60 r/min 变化到 60 r/min。通过以上 24 组仿真实验, 共得到 480 000 组含 6 个输入和 1 个输出的训练数据。随机抽取 90% 的数据作为训练

集和剩余 10% 的数据作为测试集。

### 1.3 CNN 建立、训练与应用

CNN 可有效降低网络复杂度, 减少训练参数数目, 具有较强的鲁棒性和容错能力, 易于训练和优化<sup>[15]</sup>。因此, 本文选择 CNN 作为网络模型, 网络输入为通道数为 1、尺寸为  $1 \times 6$  的特征矢量。为了充分提取特征信息, 本文采用两层卷积层, 其中第一层卷积层使用 16 个尺寸为  $1 \times 2$  的一维卷积核, 每个卷积核分别与输入特征矢量进行局部连接和卷积计算, 并以步长为 2 进行窗口滑动实现特征提取, 输出特征映射。第二层卷积基于上述特征映射, 使用 32 个尺寸为  $1 \times 2$  的一维卷积核, 以步长为 1 进行滑动连接, 以实现进一步的特征编码, 并输出给全连接层用于分类输出。全连接层整合卷积层提取到的特征映射, 将结果输出至输出层。输出层为对应 7 个电压矢量的类别得分, 并通过 Softmax 逻辑回归转换为概率分布, 从而得到神经网络判断的输出电压矢量。本文采用的 CNN 的拓扑结构如图 1 所示。

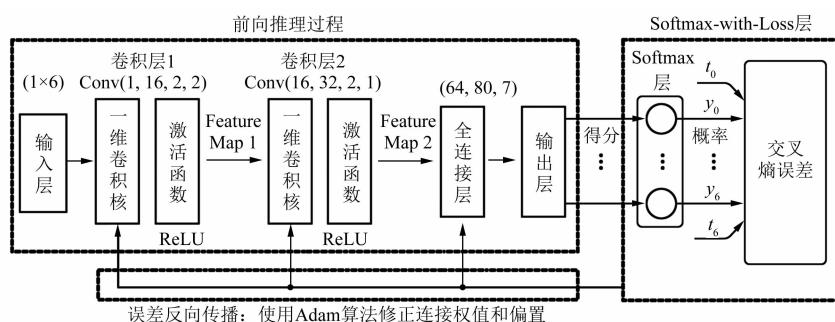


图 1 CNN 拓扑结构

CNN 的训练包括前向推理和误差反向传播两个过程, 误差反向传播过程通过梯度法寻找使得损失函数减少最多的方向, 采用交叉熵函数作为损失函数, 使用 Adam 优化器进行参数更新, 学习率设定为 0.001。重复前向推理和误差反向传播 2 个过程就可以不断修正卷积层和全连接层的连接权值和偏置等网络参数, 从而逐步逼近输入输出之间的映射关系。

定义 CNN 选择的电压矢量与 MPTC 选择的电压矢量一致的概率为准确率, 用于评价 CNN 分类性能的优劣。训练集和测试集的准确率如图 2 所示。

- 10 -

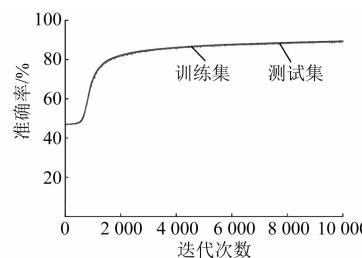


图 2 训练集和测试集准确率

图 2 表明准确率随迭代次数增加而增大, 并趋向稳定, 且无过拟合和欠拟合倾向。CNN 的分类准确率最终为 86%。将训练成熟的 CNN 取代

原有的 MPTC，则可实现基于 CNN 的 PMSM MPTC 系统，如图 3 所示。

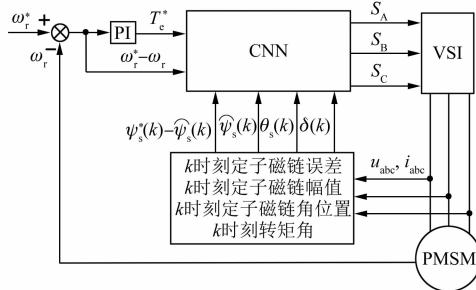


图 3 基于 CNN 的 PMSM MPTC 系统

## 2 仿真验证

通过编写 S 函数调用 Python 脚本的方式建立 Python 与 MATLAB/Simulink 的联合仿真模型。电机系统仿真参数与上文相同。参考转速初始为 60 r/min, 1 s 阶跃至 -60 r/min。负载转矩初始为 15 N·m, 0.5 s 阶跃至 -15 N·m, 1.5 s 阶跃至 15 N·m。参考定子磁链幅值为 0.3 Wb。采样周期为  $5 \times 10^{-5}$  s, 仿真总时长为 2 s。传统 MPTC 和基于 CNN 的 MPTC 下的 PMSM 转矩和定子磁链幅值分别如图 4~图 7 所示。

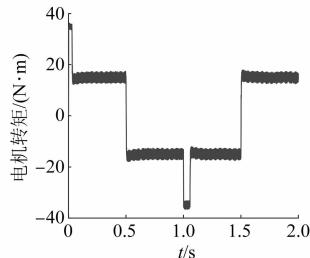


图 4 传统 MPTC 下电机转矩

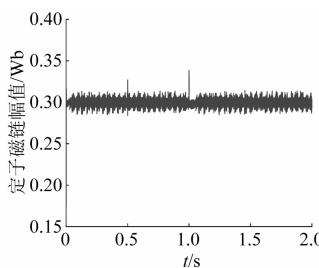


图 5 传统 MPTC 下定子磁链幅值

仿真结果表明，基于 CNN 的 PMSM MPTC 系统稳态性能良好，可实现四象限运行，但在

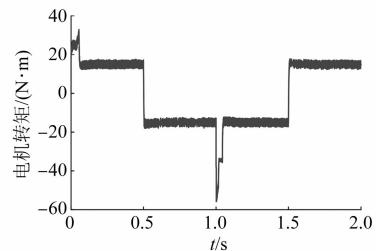


图 6 基于 CNN 的 MPTC 电机转矩

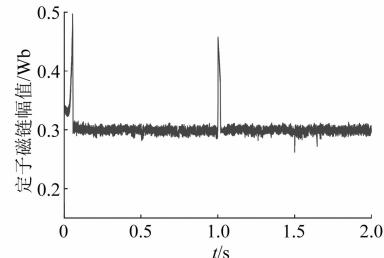


图 7 基于 CNN 的 MPTC 定子磁链幅值

起动和转速阶跃动态下控制性能较差，磁链脉动较大。

为了定量评价系统稳态控制水平，定义转矩脉动均方根误差(RMSE)和磁链脉动 RMSE，具体如下：

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

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

式中：n 为采样个数。

在 0.2~0.4 s、0.6~0.8 s、1.2~1.4 s 和 1.6~1.8 s 4 个稳态时段内，传统 MPTC 和基于 CNN 的 MPTC 的转矩脉动 RMSE 和磁链脉动 RMSE 如表 2 所示。

由表 2 可知，基于 CNN 的 MPTC 稳态性能与传统 MPTC 基本相当。

在上述仿真条件下运行传统 MPTC，同时并行运行基于 CNN 的 MPTC，但是神经网络选择的电压矢量并不作为最终输出，仅用于与传统 MPTC 选择的电压矢量进行对比。以 0.01 s 为时间单位统计各时间单位内电压矢量选择一致率，如图 8 所示。

表 2 不同控制策略下系统性能对比

评价指标	时段/s	传统 MPTC	基于 CNN 的 MPTC
转矩脉动 RMSE/(N·m)	0.2~0.4	1.087 5	1.021 2
	0.6~0.8	1.016 0	0.857 2
	1.2~1.4	1.069 2	0.989 7
	1.6~1.8	1.035 7	1.005 0
	平均	1.052 1	0.968 3
磁链脉动 RMSE/Wb	0.2~0.4	0.003 6	0.003 8
	0.6~0.8	0.004 1	0.004 9
	1.2~1.4	0.003 6	0.004 0
	1.6~1.8	0.004 3	0.005 0
	平均	0.003 9	0.004 4

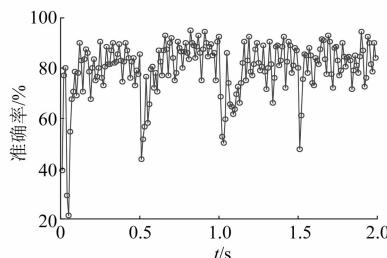


图 8 电压矢量选择一致率

由图 8 可知, 稳态下 CNN 具有较高的电压矢量选择准确率, 这也是 CNN 控制与 MPTC 两者控制效果基本相当的原因。但在动态阶跃下, CNN 选择准确率急剧下降。CNN 控制下动静态性能出现明显差异的根本原因为 MPTC 稳态和动态下成本函数选择电压矢量倾向性有较大差异。由于 CNN 控制的训练数据中动态训练数据占比很小, 网络更倾向于稳态下的选择规律, 从而造成动态下准确率较低, 磁链控制效果较差<sup>[16]</sup>。

### 3 自适应切换策略

为了提高 CNN 的动态控制性能和鲁棒性, 提出根据系统状态将基于 CNN 的 MPTC 与 DTC 自适应切换策略。当系统处于稳态时, 采用基于 CNN 的 MPTC, 而当系统处于动态时, 采用 DTC。本文采用转矩误差绝对值和磁链误差绝对值判断系统状态。当转矩误差绝对值大于 3 N·m 或定子磁链误差大于 0.015 Wb 时, 认为系统处于动态; 否则, 认为系统处于稳态。相同仿真条件下, 自适应切换控制下的 PMSM 转矩和定子磁链幅

值如图 9 和图 10 所示。

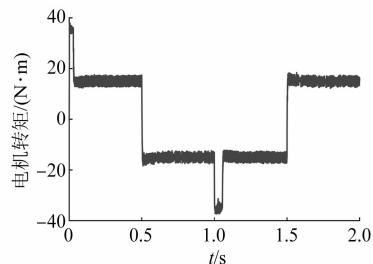


图 9 自适应切换控制下的电机转矩

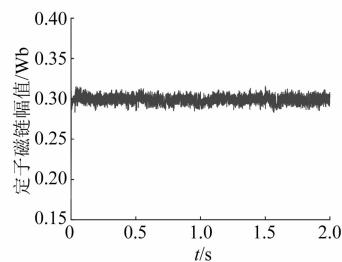


图 10 自适应切换控制下的定子磁链幅值

稳态下, PMSM 转矩脉动 RMSE 和磁链脉动 RMSE 如表 3 所示。

表 3 自适应切换控制下系统性能

时段/s	稳态转矩脉动 RMSE/(N·m)	稳态磁链脉动 RMSE/Wb
0.2~0.4	1.015 5	0.003 5
0.6~0.8	0.906 5	0.005 1
1.2~1.4	0.930 2	0.003 9
1.6~1.8	0.899 6	0.004 2
平均	0.937 9	0.004 2

仿真结果表明, 自适应切换策略可在保证稳态控制性能基础上, 有效改善动态控制性能, 抑制动态下的磁链脉动。经统计, 基于 CNN 的 MPTC 在自适应切换控制策略中参与运行时间超过 99%, DTC 仅在起动和动态阶跃等少量时刻下工作。这表明电机控制系统的控制性能主要取决于基于 CNN 的 MPTC, DTC 仅起动态纠错的作用。

### 4 结语

本文通过训练 CNN 以替代 MPTC, 将计算量大、实时性差的遍历寻优计算转移至线下网络训练, 线上仅进行快速推理和分类输出。为了进一

步提高 CNN 的动态控制性能,提出根据系统状态将基于 CNN 控制的 MPTC 与 DTC 自适应进行切换的控制策略,在保证稳态控制性能基础上改善动态控制效果,有效抑制动态下的磁链脉动。

### 【参考文献】

- [ 1 ] RODRIGUEZ J, KAZMIERKOWSKI M P, ESPINOZA J R, et al. State of the art of finite control set model predictive control in power electronics [ J ]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013, 9(2) : 1003.
- [ 2 ] KOURO S, PEREZ M A, RODRIGUEZ J, et al. Model predictive control: MPC's role in the evolution of power electronics [ J ]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2015, 9(4) : 8.
- [ 3 ] VAZQUEZ S, RODRIGUEZ J, RIVERA M, et al. Model predictive control for power converters and drives: advances and trends [ J ]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(2) : 935.
- [ 4 ] 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.
- [ 5 ] 牛峰,李奎,王尧.永磁同步电机模型预测直接转矩控制 [ J ].电机与控制学报,2015,19(12) : 60.
- [ 6 ] 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.
- [ 7 ] 刘涛,习金玉,宋战锋,等.基于多核并行计算的永磁同步电机有限集模型预测控制策略 [ J ].电工技术学报,2021,36(1) : 107.
- [ 8 ] 王红卫,祁超,魏永长,等.基于数据的决策方法综述 [ J ].自动化学报,2009,35(6) : 820.
- [ 9 ] 戴文战,娄海川,杨爱萍.非线性系统神经网络预测控制研究进展 [ J ].控制理论与应用,2009, 26 (5) : 521.
- [ 10 ] 职为梅,郭华平,范明,等.非平衡数据集分类方法探讨 [ J ].计算机科学,2012,39(增刊1) : 304.
- [ 11 ] 王乐,韩萌,李小娟,等.不平衡数据集分类方法综述 [ J ].计算机工程与应用,2021,57(22) : 42.
- [ 12 ] 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.
- [ 13 ] 李耀华,赵承辉,周逸凡,等.基于卷积神经网络和直接转矩控制的永磁同步电机模型预测转矩控制策略 [ J ].电机与控制应用,2020,47(9) : 8.
- [ 14 ] 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.
- [ 15 ] 周飞燕,金林鹏,董军.卷积神经网络研究综述 [ J ].计算机学报,2017,40(6) : 1229.
- [ 16 ] 张启蕊,张凌,董守斌,等.训练集类别分布对文本分类的影响 [ J ].清华大学学报(自然科学版),2005(增刊1) : 1802.

### 声 明

本刊已许可万方数据、重庆维普、中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、北京世纪超星信息技术发展有限责任公司在其网站及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网

络传播本刊全文。该社著作权使用费与本刊相关费用抵消。如作者不同意文章被收录,请在来稿时向本刊声明,本刊将做适当处理。

《电机与控制应用》编辑部

扫码关注  
《电机与控制应用》  
微信公众号

