

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.01.042

基于迭代数据库的齿槽转矩匹配追踪与补偿

张立博, 李昌伟, 王凯, 李明, 李帅

(中国绿发投资集团有限公司, 北京 100010)

摘要:针对永磁同步电机中齿槽转矩的建模困难且参数耦合等缺陷,提出一种基于迭代式数据库的齿槽转矩匹配追踪与补偿方法。基于齿槽转矩的物理特性,构建以特征频率为分解参数的时频特性字典库。通过设计一种迭代式数据库,建立自适应更新淘汰机制来逐一匹配字典库中的最佳原子;实时映射数据库中的转矩电流到最佳原子,从而获得模型参数;通过构建前馈补偿组件,在仿真平台上验证了齿槽转矩的在线抑制效果。

关键词:齿槽转矩;辨识与补偿;永磁同步电机;迭代式数据库;匹配追踪

中图分类号:TM351 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2025)01-0202-04

Matching Pursuit and Compensation of Cogging Torque Based on Iterative Database

ZHANG Libo, LI Changwei, WANG Kai, LI Ming, LI Shuai

(China Green Development Investment Group Co., Ltd., Beijing 100010, China)

Abstract:To deal with the modeling difficulty and parameter coupling defects of the cogging torque in permanent magnet synchronous motor, a new method of matching pursuit and compensation of the cogging torque based on iterative database is proposed. Based on the physical characteristics of the cogging torque, a time-frequency characteristic dictionary with the characteristic frequency and phase being decomposition parameters is constructed. By designing an iterative database, an adaptive updating and elimination mechanism is developed to match the best atoms of the dictionary database one by one. The thrust current in the database is mapped to the optimal atom in real time, so that the model parameters are obtained. By constructing a feedforward compensation component, the online cogging torque suppression effect is verified on the simulation platform.

Keywords: cogging torque; identification and compensation; permanent magnet synchronous motor; iterative database; matching pursuit

0 引言

永磁同步电机(PMSM)具有精度高、功率密度大和结构简单等优势,已广泛应用于电动汽车、数控机床和工业机器人等工业领域^[1]。然而,由于自身结构的缺陷,永磁体和定子齿槽之间不平衡产生的相互作用力会导致齿槽转矩的出现,从而影响伺服电机的位置精度,尤其在低速时会严重恶化其控制性能。抑制齿槽转矩的方法分为优化电机结构和基于控制思想,本文致力于后者。

基于控制思想的方法一般分为3种:1)控制器,例如迭代学习控制^[2]、自适应控制^[3];2)无需建立齿槽转矩模型的辨识与补偿技术,例如干扰观测器^[4-6];3)需要建立齿槽转矩模型的辨识与补偿技术,例如周期自适应控制^[7-8]、最小二乘法^[9-10]、即时学习算法^[11]。先进的控制器虽然可

以提高系统鲁棒性和控制性能,但是在面对非周期性扰动或者低速运行时,效果并不理想,并且复杂性也较大。

由于涉及到对齿槽转矩的实时辨识,辨识与补偿技术是抑制齿槽转矩最有效的方法。其中干扰观测器的思想是将齿槽转矩作为统一的外部扰动进行辨识,但是这对观测器的性能要求比较高,特别是面对高频变化的齿槽转矩,容易导致较差的辨识结果。相比较而言,建立齿槽转矩模型的辨识与补偿技术更有优势,其基本思想是:首先在离线条件下,要求电机处于低速且匀速的工况,基于电流特性与齿槽转矩特性近似的特点,通过FFT获得齿槽转矩特征频率;然后利用相关算法线性拟合齿槽转矩的模型参数。然而,尽管此方法能够得到较为完整的齿槽转矩,但是在苛刻运行条件下的特征频率提取使它失去竞争优势,这

基金项目:中国绿发投资集团有限公司科技项目(CGDG529000220008)

第一作者简介:张立博(1980—),男,山东济南人,工程师,硕士,研究方向为智能控制、网络技术、信息化技术等,2580432236@qq.com。

严重限制了实际工程的应用范围。

基于以上分析,本文提出一种基于改进匹配追踪(MP)的齿槽转矩特征频率和模型参数在线提取方法,通过构建以特征频率为分解参数的时频特性字典库,利用MP方法将由转矩电流组成的原始数据库与原子库的原子逐一匹配来获得与齿槽转矩特征频率一致的最佳原子。然后,将原始数据库映射到最佳原子,进而辨识出齿槽转矩的模型参数。此外,设计一种迭代式伺服系统输入输出数据库,建立自适应更新淘汰机制来提高匹配追踪的辨识性能和实时性,实现对齿槽转矩的特征频率和模型参数的同时在线辨识。

1 PMSM 和齿槽转矩建模

在使用PMSM的伺服系统中,采用励磁电流为0的双环矢量位置控制策略。其中,电流环具有较高的带宽,保证电流的精确跟踪是必要的,可以将电流环的传递函数等效为1。因此建立动力学方程如下:

$$J_m \frac{d\dot{X}_f}{dt} = k_f i_q - B_m \dot{X}_f - F_{rip} \quad (1)$$

式中: X_f 和 i_q 分别为实际位置和转矩电流; J_m 和 B_m 分别为电机惯量和摩擦因数; k_f 和 F_{rip} 分别为转矩系数和齿槽转矩。

齿槽转矩是由一系列正弦谐波组成,其周期与转子的位置函数有关,可以被表达如下:

$$F_{rip}(X_f) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin\left(n \frac{2p_n N_s}{N_c} X_f\right) \quad (2)$$

式中: p_n 和 N_s 分别为转子极对数和定子槽数; a_n 为第 n 次谐波的幅值; N_s 为经验因子。

由于齿槽转矩的高阶谐波分量相对较弱,在实际控制方案中可以忽略。因此,简化的齿槽转矩模型为

$$F_{rip}(X_f) = A_1 \sin(2\pi\beta_1 X_f) + A_2 \cos(2\pi\beta_2 X_f) \quad (3)$$

式中: β_1 和 β_2 为与实际位置相关的齿槽转矩特征频率; A_1 和 A_2 为齿槽转矩的模型参数。

2 基于迭代数据库的齿槽转矩匹配追踪与在线补偿

2.1 基于改进MP的齿槽转矩辨识

根据式(3)中齿槽转矩的物理特性,构造以特征频率为分解参数的时频特性字典库,即 $C_1 = \{g_\gamma : \gamma = 1, 2, \dots, K\}$ 和 $C_2 = \{h_\gamma : \gamma = 1, 2, \dots, K\}$ 。其中 g_γ 和 h_γ 分别为字典库中 C_1 和 C_2 的

原子。

设置 Q 为原始数据库,定义如下:

$$Q = [i_q(1) \quad i_q(2) \quad \dots \quad i_q(k)] \quad (4)$$

构建基于齿槽转矩的时频特性字典库:

$$\begin{cases} g_\gamma(\beta_{i1}, k) = \sin(2\pi\beta_{i1} X_f(k)) \\ h_\gamma(\beta_{i2}, k) = \cos(2\pi\beta_{i2} X_f(k)) \end{cases} \quad (5)$$

式中: β_{i1} 和 $\beta_{i2} \in \Phi = [b_1 \quad b_2]$,其中 b_1 和 b_2 分别为集合 Φ 的下边界和上边界。

为保证一致性,归一化字典库中的原子为

$$\begin{cases} \hat{g}_\gamma(\beta_{i1}, k) = \|g_\gamma(\beta_{i1}, k)\| \\ \hat{h}_\gamma(\beta_{i2}, k) = \|h_\gamma(\beta_{i2}, k)\| \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\|g_\gamma(\beta_{i1}, k)\| = \sqrt{[g_\gamma(\beta_{i1}, k), g_\gamma(\beta_{i1}, k)]}$,其中 $[\cdot, \cdot]$ 为两个信号的内积运算。

基于搜索步长 J_d ,从字典库中选取 C_1 的归一化原子与原信号 Q 进行内积,可分解为

$$Q = [Q, \hat{g}_\gamma(\beta_{i1}, k)] \hat{g}_\gamma(\beta_{i1}, k) + Q^1 \quad (7)$$

式中 Q^1 为一次残差数据库。由于 Q^1 正交于 $\hat{g}_\gamma(\beta_{i1}, k)$,可得

$$\|Q\|^2 = \|[Q, \hat{g}_\gamma(\beta_{i1}, k)] \hat{g}_\gamma(\beta_{i1}, k)\|^2 + \|Q^1\|^2 \quad (8)$$

为了最小化 $\|Q^1\|^2$ 的能量,结果需满足:

$$|(Q, \hat{g}_{\gamma_{best}})| = \sup |[Q, \hat{g}_\gamma(\beta_{i1}, k)]| \quad (9)$$

式中: $\hat{g}_{\gamma_{best}}$ 为 C_1 中的最佳原子; $\sup$ 表示两个信号内积的上限。

因此得到正弦分量的特征频率和模型参数:

$$\beta_1^*(k) = \operatorname{argmax} |[Q, \hat{g}_\gamma(\beta_{i1}, k)]| \quad (10)$$

$$A_1^*(k) = \max \{ [Q, \hat{g}_\gamma(\beta_{i1}, k)] \hat{g}_\gamma(\beta_{i1}, k) \} \quad (11)$$

式中 arg 为 $[Q, \hat{g}_\gamma(\beta_{i1}, k)]$ 最大时 $\hat{g}_\gamma$ 的特征频率。

同理,从字典库中选取 C_2 的归一化原子与一次残差数据库 Q^1 进行内积,可分解为

$$Q^1 = [Q^1, \hat{h}_\gamma(\beta_{i2}, k)] \hat{h}_\gamma(\beta_{i2}, k) + Q^2 \quad (12)$$

式中 Q^2 为二次残差数据库,进而可得

$$|(Q^1, \hat{h}_{\gamma_{best}})| = \sup |(Q^1, \hat{h}_\gamma)| \quad (13)$$

式中 $\hat{h}_{\gamma_{best}}$ 为 C_2 中的最佳原子。

因此得到余弦分量的特征频率和模型参数:

$$\beta_2^*(k) = \operatorname{argmax} |[Q^1, \hat{h}_\gamma(\beta_{i2}, k)]| \quad (14)$$

$$A_2^*(k) = \max \{ [Q^1, \hat{h}_{\gamma_{best}}(\beta_{i2}, k)] \hat{h}_{\gamma_{best}}(\beta_{i2}, k) \} \quad (15)$$

2.2 基于迭代式更新的数据库

从式(4)可以看出随着原始数据库中添加越来越多的数据样本,匹配追踪所花费的计算负担也会增加。为了提高辨识方法的辨识性能和实时性,提出如下的基于迭代式更新的原始数据库。

定义 k 时刻的向量为 $S_k = [X(k-1) \quad i_q(k-1)]$, 固定数据库为 N , 设计新的数据库如下:

$$S_k = [s_1, s_2, \dots, s_N] \quad (16)$$

给定查询数据库为 s_d , 从数据库 S_k 中选择与查询数据相似的相关向量。因此定义以下相似度计算公式:

$$D(s_n, s_d)_{n=1 \sim N} = \delta \sqrt{e^{-\|s_d - s_n\|^2}} + (1 - \delta) \cos \theta_n \quad (17)$$

$$\text{if } \cos \theta_n \geq 0$$

$$\theta_n = \cos^{-1} \left(\frac{(s_d - s_{d-1}) \cdot (s_n - s_{n-1})^T}{\|s_d - s_{d-1}\| \cdot \|s_n - s_{n-1}\|} \right) \quad (18)$$

式中: $\delta \in (0, 1)$; $D(s_n, s_d) \in (0, 1)$ 。当 $D(s_n, s_d)$ 的值越接近 1 时, 说明数据库中 s_n 和查询数据 s_d 越相似。需要注意的是如果 $\cos \theta_n$ 是负的, 则查询数据将被舍弃, 数据库维持不变。

基于相似度向量构建如下的近似邻域:

$$\Omega = [(X(1), s_1), (X(2), s_2), \dots, (X(N), s_N)],$$

$$D(s_1, s_d) > D(s_2, s_d) > \dots > D(s_N, s_d) \quad (19)$$

通过设定相似度阈值, 数据库 S_k 的更新策略如下: 1) 当 $D(s_n, s_d)$ 大于相似度阈值时, 表明模型参数变化不明显, 应丢弃查询数据 s_d ; 2) 当 $D(s_n, s_d)$ 小于相似度阈值时, 将查询数据 s_d 更新到数据库中, 并舍弃最不相关的数据样本 s_N 。新的原始数据库重新定义为

$$Q = [s_1(2), s_2(2), \dots, s_N(2)] \quad (20)$$

因此, 带有固定长度为 N 的新型数据库提高了匹配追踪的实时性, 并且基于领域原则保证数据样本的相关性, 进而改善匹配追踪的辨识性能。

2.3 齿槽转矩在线补偿

基于以上分析, 构建基于齿槽转矩的前馈补偿:

$$i_{rip} = \frac{1}{k_f} [A_1^* \sin(2\pi\beta_1^* X_f) + A_2^* \cos(2\pi\beta_1^* X_f)] \quad (21)$$

基于迭代数据库的齿槽转矩匹配追踪与在线补偿系统框图如图 1 所示。不同于现有的齿槽转矩辨识与补偿技术, 所提方法无需在离线的严苛条件下获取齿槽转矩的特征频率, 可以在线同时提取齿槽转矩的特征频率和模型参数。

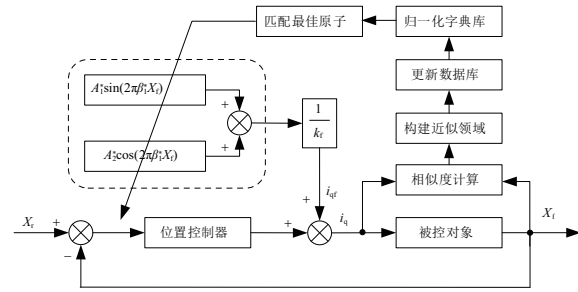


图 1 系统框图

3 仿真研究

3.1 初始化设置

利用 Matlab/Simulink 搭建的仿真平台来验证所提方法的性能, PMSM 的机械参数如表 1 所示。算法初始化如下: $b_1 = 0.1$ 、 $b_2 = 0.2$ 、 $J_d = 0.002$ 、 $N = 30$ 、 $\delta = 0.8$; 位置指令为 $X_r = 30 \cos(4\pi T_s t)$, 其中设置采样时间 $T_s = 0.001$; 齿槽转矩为

$$F_{rip}(X_f) = 30 \sin(2\pi 0.25 X_f) + 40 \cos(2\pi 0.25 X_f) \quad (22)$$

表 1 PMSM 参数

参数名称	数值
转矩系数/(Nm · A ⁻¹)	0.14
电机惯量/(kg · m ²)	0.000 174
摩擦因数/(Nm · s · rad ⁻¹)	0.08
转子极对数	5
电阻/Ω	0.08
电感/mH	0.3

3.2 仿真结果

为了验证所提方法的优势, 引入了两个对比算法: 1) 文献[5]中的扰动观测器, 其中设置学习率为 $\kappa = 0.12$; 2) 未改进的 MP 算法, 其参数设置与所提方法的一致。图 2 显示未加入补偿算法的位置误差, 可以看出齿槽转矩会严重恶化位置精度。图 3 显示齿槽转矩补偿后的位置误差(本刊黑白印刷, 相关疑问请咨询作者), 可以发现基于扰动观测器的补偿效果最差, 依然存在许多毛刺。这是因为观测器很难观测处于高频变化的齿槽转矩。同时, 基于 MP 的补偿效果也不理想, 并且收敛速度也比较慢。这是因为 MP 算法构建的数据库庞大而且冗余, 存在较多的无效数据, 导致辨识精度和收敛速度都比较差。相比较之下, 本文所提方法有着明显的优势, 基本上消除了齿槽转矩

引起的位置误差毛刺。基于所提方法提取的齿槽转矩模型参数和特征频率如图4—图7所示。

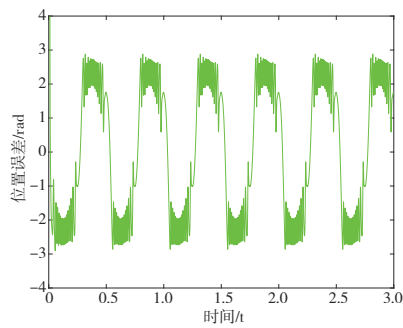


图2 未加入补偿算法的位置误差

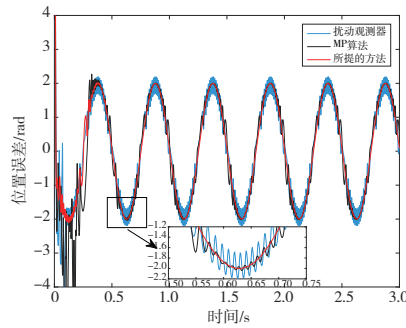
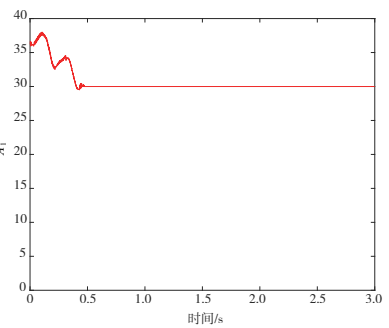
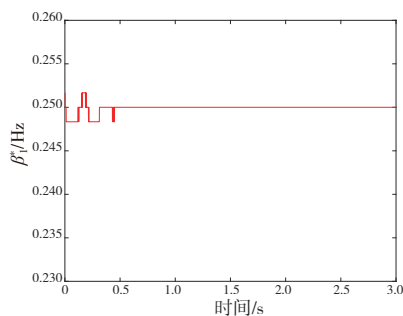
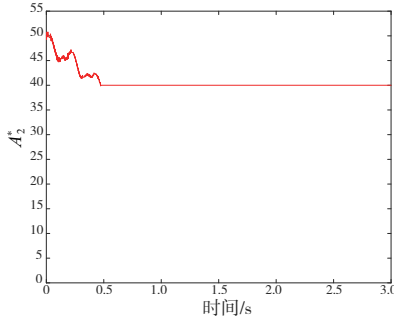
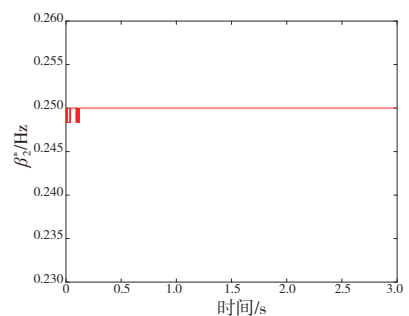


图3 加入补偿算法的位置误差

图4 辨识的齿槽转矩模型参数 A_1^* 图5 辨识的齿槽转矩特征频率 β_1^* 图6 辨识的齿槽转矩模型参数 A_2^* 图7 辨识的齿槽转矩特征频率 β_2^*

为了更有效地验证所提方法的优势,图8显示每种方法辨识的齿槽转矩。从中看出相比于另外两种方法,所提方法的估计性能更加稳定和精准。此外,在表2所显示的不同方法齿槽转矩辨识性能量化对比中,所提方法的收敛时间是0.4 s,仅次于扰动观测器的0.36 s,这得益于基于迭代式更新的数据库,提高了算法实时性。同时,从最大误差值和方均根误差可以看出,所提方法在辨识稳定上和辨识精度上也极具有竞争力。总之,通过对MP算法的改进以及与迭代更新数据库思想的结合,提出的同时在线提取齿槽转矩模型参数和特征频率的辨识方法效果更好。

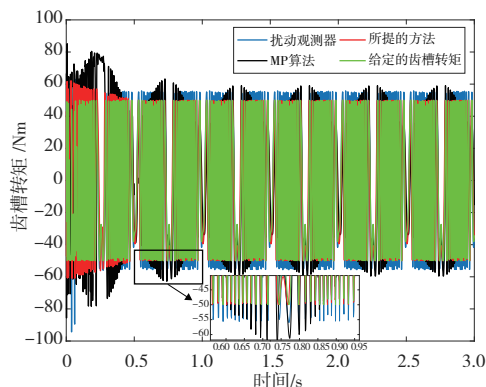


图8 齿槽转矩辨识对比

表2 不同方法下齿槽转矩的辨识性能对比

对比方法	收敛时间/s	最大误差值/Nm	方均根误差/Nm
扰动观测器	0.36	12.12	15.669 1
MP 算法	0.62	30.42	11.102 4
所提的方法	0.40	10.76	6.581 1

4 结语

本文致力于解决传统的齿槽转矩辨识和补偿的缺陷,提出了一种基于迭代式更新数据库的齿槽转矩匹配追踪与在线补偿方法。详细的理论分析验证了所提方法可以在线同时提取的齿槽转矩的特征频率和齿槽转矩。与此同时仿真结果表明:在迭代式数据库的更新作用下,该方法能够在保证实时性的基础上,拥有较好的收敛速度和辨识精度,提高了伺服系统的控制性能。

参考文献:

- [1] 陈公兴.基于伺服驱动的机器人精度与可靠性优化研究[J].机械制造与自动化,2022,51(3):183-186,224.

(下转第226页)

比,在测量精确度劣于 $0.021\ 2^\circ$ 的测量场景下,表面孔垂直度快速检测仪(SHPQI)与三坐标测量机的测量结果差值与测量波动性没有显著差异;在置信水平为 95% 的条件下,两种测量设备测量差值的置信区间为 $[-0.135\ 8, 0.178\ 2]$,差值为 $0.021\ 2^\circ$ 。

参考文献:

- [1] 张宏伟,徐春龙,武耀罡.飞机机身螺栓连接多钉载荷合理分配研究[J]. 计算机仿真,2019,36(6):83-86.
- [2] LI Y, WU Z, HUANG P L, et al. A new method for analyzing integrated stealth ability of penetration aircraft[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2010, 23(2): 187-193.
- [3] 袁红璇.飞机结构件连接孔制造技术[J]. 航空制造技术, 2007, 50(1): 96-99.
- [4] 毕运波,徐超,樊新田,等.基于视觉测量的沉头孔垂直度检测方法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2017, 51(2): 312-318.
- [5] 杨超,吴瑜娜.一种基于双相机对称测量法的螺纹孔垂直度自动检测系统[J]. 南昌航空大学学报(自然科学版), 2020, 34(1): 82-88.
- [6] 田正芳,陈胜迁,张世国.汽车减速器壳体垂直度公差检测与评价[J]. 机械制造, 2021, 59(11): 72-75.
- [7] 党威武,李会荣,李慎安.异面间垂直度的检测装置设计与误差分析[J]. 自动化技术与应用, 2020, 39(8):

111-114.

- [8] 王建.连接孔垂直度误差对复合材料连接性能的影响[D]. 大连:大连理工大学, 2016.
- [9] 庞静茹,谭景升,牛亦琰,等.基于最小二乘拟合波矢估计的角位移测量方法[J]. 光学技术, 2022, 48(5): 589-596.
- [10] 蒋晓耕,孟祥冬,杨肖,等.表面粗糙度对激光位移传感器测量精度的影响和补偿[J]. 工具技术, 2022, 56(12): 156-158.
- [11] 段长超,刘青正,韩震宇,等.双通道闭环步进电机控制器设计[J]. 机电工程, 2020, 37(8): 977-982.
- [12] HAN K G, 测量系统分析(MSA)参考手册[Z]. 3版, [S.I.]: AIAG, 2002.
- [13] JJF1059.1—2012 测量不确定度评定与表示[S].
- [14] 陈凡荣,佟毅,刘海滨,等.利用 Minitab 软件优化燃料乙醇生产发酵条件[J]. 酿酒科技, 2020(4): 65-69.
- [15] 王娅茹,唐明.基于 Bartlett 和多分类 F 检验侧信道泄露评估[J]. 通信学报, 2021, 42(12): 35-43.
- [16] 刘甲明,李静,梁建山.利用 Minitab 软件进行钢管壁厚度的双样本 T 检验[J]. 山东冶金, 2018, 40(4): 53-54, 56.

收稿日期:2023-06-05

(上接第 205 页)

- [2] WANG J X. Fuzzy adaptive repetitive control for periodic disturbance with its application to high performance permanent magnet synchronous motor speed servo systems[J]. Entropy, 2016, 18(9): 261.
- [3] PETROVIC V, ORTEGA R, STANKOVIC A M, et al. Design and implementation of an adaptive controller for torque ripple minimization in PM synchronous motors[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2000, 15(5): 871-880.
- [4] LI S H, YANG J, CHEN W H, et al. Generalized extended state observer based control for systems with mismatched uncertainties [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(12): 4792-4802.
- [5] YANG C B, SONG B, XIE Y L, et al. Stable simultaneous inertia and disturbance torque identification for SPMSM drive systems subject to mismatched rotor flux linkage[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 10(2): 2445-2462.
- [6] 付兴贺,顾胜东,何航,等.基于新型串联内模扩张状态观测器的 PMSM 齿槽转矩补偿控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(23): 8729-8740.

- [7] ZHANG W J, CAO B W, NAN N, et al. An adaptive PID-type sliding mode learning compensation of torque ripple in PMSM position servo systems towards energy efficiency[J]. ISA Transactions, 2021, 110: 258-270.
- [8] ZHANG W J, NAN N, YANG Y F, et al. Force ripple compensation in a PMLSM position servo system using periodic adaptive learning control[J]. ISA Transactions, 2019, 95: 266-277.
- [9] ZHAO S, TAN K K. Adaptive feedforward compensation of force ripples in linear motors[J]. Control Engineering Practice, 2005, 13(9): 1081-1092.
- [10] LI X J, WANG Y G. Sliding-mode control combined with improved adaptive feedforward for wafer scanner [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 103: 105-116.
- [11] LU S W, TANG X Q, SONG B, et al. Identification and compensation of force ripple in PMSLM using a JITL technique[J]. Asian Journal of Control, 2015, 17(5): 1559-1568.

收稿日期:2023-10-11