

计及转矩储备的车用双转子电机转矩控制策略

杨明磊, 李俊兴, 王业勤, 钟再敏

(同济大学 汽车学院, 上海 201804)

摘要: 针对电机定子电流变化率受到定子绕组电感的制约, 进而影响电机转矩的快速变化的问题, 提出了一种计及转矩储备的车用双转子电机转矩控制策略。首先, 推导了双转子电机的数学模型, 分析了转矩空间变化率的基本表达式及其与矩角特性之间的关系; 其次, 基于永磁电机的矩角特性, 制定了计及转矩储备的电流控制策略, 即在转矩快速变化之前预先加载定子电流, 使得转矩快速变化阶段可保持定子电流恒定, 以便通过转子的旋转带动转矩角的变化来实现转矩的快速输出; 最后, 搭建了转矩储备控制策略的仿真模型和实验台架, 通过仿真和实验验证了所提出控制策略的正确性与可行性。

关键词: 双转子电机; 矢量控制; 转矩储备; 电机模型

中图分类号: U463. 6

文献标志码: A

Torque Control Strategy for Dual-Rotor Motor for Vehicles for Torque Reserve

YANG Minglei, LI Junxing, WANG Yeqin, ZHONG Zaimin
(School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: In this paper, a torque reserve control strategy for dual-rotor motor for vehicles is proposed to address the issue that the rate of change of motor stator current is limited by the inductance of the stator windings, which affects the rapid change of motor torque. Firstly, the mathematical model of the dual-rotor motor is derived, and the basic expression for the spatial rate of torque change is analyzed along with its relationship to the torque-angle displacement characteristic. Next, a current control strategy considering the torque reserve is formulated based on the torque-angle displacement characteristic of the PMSM. Specifically, the stator current is preloaded before the rapid torque changes, while maintaining the stator current constant during the rapid torque change stage, aiming to achieve the rapid

torque output by the change of the torque angle driven by the rotation of the rotor. Finally, a simulation model and experimental platform for the torque reserve control strategy are created, and the correctness and feasibility of the proposed control strategy are verified through simulations and experiments.

Keywords: dual rotor motor; vector control; torque reserve; motor model

永磁电机具有功率密度高、可靠性好等优点, 被广泛应用于机器人、飞行器和电动汽车等领域^[1-2]。在电动汽车领域, 车用永磁电机在一些特殊工况下需要实现快速的转矩动态变化。例如, 在增程式电动汽车的技术方案中, 电机的快速转矩动态变化能够配合发动机转矩的快速上升, 实现发动机转矩的平衡, 减小辅助动力系统(APU)的振动。

目前, 针对车用永磁电机转矩快速动态变化控制方法的研究主要有两类, 分别是直接转矩控制(DTC)和磁场定向矢量控制(FOC)。直接转矩控制借助滞环控制器, 可以实现转矩的快速响应, 但是这种 Bang-Bang 控制方式存在纹波大、开关频率不固定等缺陷^[3]。为了改善 DTC 的控制性能, 文献[4]提出了一种基于转矩角控制的 SVM-DTC 系统, 减小了转矩脉动的同时简化了系统的结构。文献[5]结合滑膜控制建立了 SMC-DTC 控制模型, 与传统 DTC 模型进行对比证明所提出的 SMC-DTC 模型在具有良好的转矩动态响应的同时也抑制了转矩脉动和磁通纹波, 但这也使得系统结构变得复杂。总之, DTC 在实现转矩的快速响应上具有很大的优势, 但该控制方法会引入额外的转矩脉动和磁通纹波。

相比于 DTC 控制, 磁场定向矢量控制(FOC)也

收稿日期: 2023-12-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(52202448)

第一作者: 杨明磊(1993—), 男, 博士生, 主要研究方向为车用电机的设计与控制。E-mail: 1241130609@qq. com

通信作者: 钟再敏(1973—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为新能源汽车电驱动技术。E-mail: zm_zhong@tongji. edu. cn

可以实现转矩的快速动态变化。有的研究人员对传统 FOC 控制策略进行改进,在动态过程中通过电流补偿的方式来提高转矩的快速响应能力^[6]。也有研究人员将最优控制^[7]、预测控制^[8-9]、和滑膜控制^[10]等技术与 FOC 控制相结合,来提高电机的响应速度。例如,文献[8]提出了一种改进的预测控制模型,缩短了电流控制延时并降低了系统参数的敏感性,从而提高电流的动态响应性能。上述的控制方法都无法完全避免绕组电感对电流快速变化的限制,这也使转矩动态调节的速度受到限制。

本文针对车用永磁同步电机(PMSM)传统控制方法动态性能不足的问题,在现有矢量控制的基础上提出了一种转矩储备的控制策略。所谓的转矩储备就是基于电机的矩角特性,制定电流幅值和转矩角随转子位置变化的规律,在转矩输出之前提前加载电流到预设值,在需要转矩输出的阶段保持相电流幅值不变,利用转子机械角度的变化带动转矩角的改变实现转矩的快速输出。该控制策略避免了电感对电流变化率的制约,为转矩的快速动态变化提供了新思路。

1 双转子电机的数学模型

本文研究对象是径向磁通双转子电机,其结构示意图如图1所示。其特点是内、外两个转子共用一套定子绕组。在正常工作时两个转子的旋转方向和转速均相同。

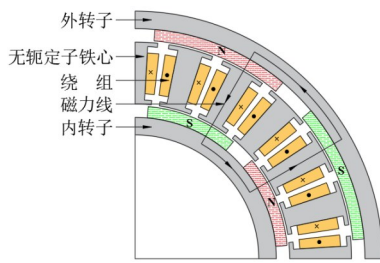


图1 双转子电机的结构

Fig.1 Structure of dual rotor motor

本文研究的双转子电机是NS型串联磁路结构。该结构的特点是径向上正对的内、外永磁体的充磁方向一致,这也就意味着外转子的dq同步坐标系与内转子的dq同步坐标系是重合的。双转子电机在同步坐标系下的物理模型如图2所示。定子交、直轴磁链分量可以表示为

$$\psi_d = L_d i_d + \phi_i^i + \phi_i^o \quad (1)$$

$$\psi_q = L_q i_q \quad (2)$$

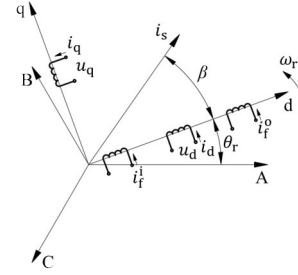


图2 双转子电机的物理模型

Fig.2 Physical model of dual rotor motor

令 $\phi_i = \phi_i^i + \phi_i^o$, 可以发现双转子电机与单转子永磁电机的磁链表达式相同。这意味着, 双转子电机可以采用传统永磁电机的控制方式。基于文献[11]所提出的牵连运动电动势概念, 可以直接写出定子的电压方程如下:

$$u_s^{dq} + e_{ms}^{dq} = i_s^{dq} R_s + \frac{d}{dt} \psi_s^{dq} \quad (3)$$

式中: $e_{ms}^{dq} = -j\omega_r \psi_s^{dq}$; 电压矢量 $u_s^{dq} = u_d + ju_q$; 电流矢量 $i_s^{dq} = i_d + ji_q$; 磁链矢量 $\psi_s^{dq} = \psi_d + j\psi_q$ 。同样, 双转子永磁电机的电磁转矩可以由磁共能对转子位置的偏导计算得到。限于篇幅, 本文直接引用转矩矢量的结论, 即转矩等于定转子磁链正交分量之积^[12]。

$$t_e = \frac{3}{2} p_0 [\phi_i i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (4)$$

式中: p_0 为电机的极对数。在极坐标下, 满足 $i_d = i_s \cos \beta$, $i_q = i_s \sin \beta$, 则双转子电机的转矩公式可以写为

$$t_e = \frac{3}{2} p_0 \left[\phi_i i_s \sin \beta + \frac{1}{2} (L_d - L_q) i_s^2 \sin 2\beta \right] \quad (5)$$

式中 β 为转矩角。

2 转矩储备原理

2.1 转矩的空间变化率

电机转矩的响应速度是以转矩的时间变化率快慢作为衡量的标准。但对于发动机来说, 转矩的变化与曲轴的空间位置有关, 因此需要分析转矩的空间变化率与转矩的时间变化率之间的关系。电机的空间电角度 $\theta_r = \omega_r t$, 则转矩对空间电角度 θ_r 的偏导可以表示为

$$\frac{\partial t_e}{\partial \theta_r} = \frac{\partial t_e}{\partial t} \frac{1}{\omega_r} \quad (6)$$

即

$$\frac{\partial t_e}{\partial t} = \frac{\partial t_e}{\partial \theta_r} \omega_r \quad (7)$$

因为发动机燃烧转矩只是与曲轴空间位置有关,所以燃烧转矩的空间变化率是固定的。从公式(7)可以发现,随着转速的增大转矩的时间变化率增大,这对电机转矩的快速变化提出了更高的要求。根据公式(4),转矩对空间电角度 θ_r 的偏导可以表示为

$$\frac{\partial t_e}{\partial \theta_r} = \frac{3}{2} p_0 \left[\psi_f \frac{\partial i_q}{\partial \theta_r} + (L_d - L_q) \left(i_d \frac{\partial i_q}{\partial \theta_r} + i_q \frac{\partial i_d}{\partial \theta_r} \right) \right] \quad (8)$$

根据文献[12]对电流坐标变换的推导可知,式中的 $\partial i_d / \partial \theta_r = i_q$ 、 $\partial i_q / \partial \theta_r = -i_d$,则公式(8)可以简写为

$$\frac{\partial t_e}{\partial \theta_r} = \frac{3}{2} p_0 \left[-\psi_f i_d + (L_d - L_q) (-i_d^2 + i_q^2) \right] \quad (9)$$

在极坐标下,转矩对于转矩角的偏导可以表示成

$$\frac{\partial t_e}{\partial \beta} = \frac{3}{2} p_0 \left[\psi_f i_d + (L_d - L_q) (i_d^2 - i_q^2) \right] \quad (10)$$

对比公式(9)和(10)可以发现电机转矩的空间变化率与转矩对转矩角的偏导互为相反数,即

$$\frac{\partial t_e}{\partial \theta_r} = -\frac{\partial t_e}{\partial \beta} \quad (11)$$

公式(11)表明,通过改变电机定、转子之间的位置角 θ_r 就能实现转矩的动态变化。

2.2 转矩储备原理

根据公式(5),可以得到不同电流幅值下永磁电机的矩角特性曲线,如图3所示。假设将图3中的A点转矩值增大为B点的转矩值,利用传统的MTPA电流控制策略,电流将沿着图3中的实线从 i_A 增大到 i_B 。若该转矩变化要求的很快,就需要电流的幅值实现快速的变化,但电流的变化率会受到绕组电感的制约。在图3中还存在另外一种电流控制方式,先将A点的电流 i_A 预加载至C点的电流 i_C ,该过程转矩不变。然后通过调节转矩角 β 实现C点转矩值到B点转矩值的变化。因为 i_B 与 i_C 的幅值相等,所以该过程中转矩的快速变化不会受到绕组电感的制约。将电流从A点预加载到C点的过程称为转矩储备,将C点转矩值增大到B点转矩值的过程称为转矩释放。

2.3 转矩储备的电流控制策略

以单缸四冲程发动机一个工作循环为背景来介绍所提出的转矩储备电流控制策略。单缸发动机一个工作循环的转矩曲线如图4所示。从简化后的转矩曲线可以看出,转矩的变化对应着固定的曲轴位置。基于这一特点,制定了相应的电流控制策略。

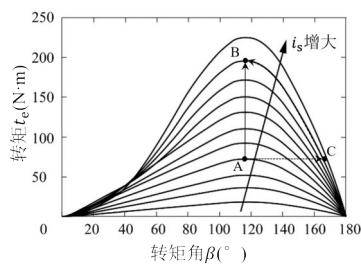


图3 不同电流幅值下的矩角特性

Fig.3 Torque-angle displacement characteristic at different current amplitudes

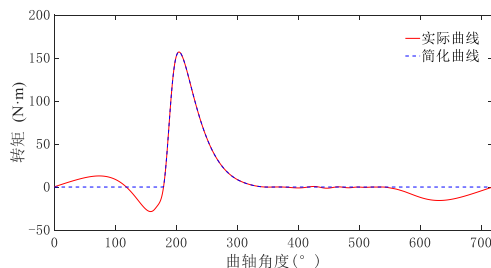


图4 单缸四冲程发动机转矩曲线

Fig.4 Torque curve of single-cylinder four-stroke internal combustion engine

将一个工作循环的电流控制策略分成五个阶段,分别是转矩储备、转矩释放、转矩保持、转矩归零和电流归零阶段。如图5所示,在转矩储备阶段,定子电流幅值增大并保持转矩角 β 为 360° ,此时阶段电机没有转矩输出;在转矩释放阶段,定子电流矢量不变,转矩角 β 随转子转动从 360° 减小至 270° ,此过程电机转矩从零快速增大到目标值;在转矩保持阶段,为了更好地平衡内燃机的燃烧转矩,需要保持一段时间的最大转矩输出,所以在此阶段内保持定子电流幅值及转矩角 β 不变;在转矩归零阶段,定子电流幅值不变,转矩角 β 随转子转动由 270° 减小至 180° ,电机的转矩快速减小为零。在电流归零阶段,电流减小至零,转矩角 β 也减小至 0° 完成一个工作循环。

基于上述电流控制策略得到的转矩变化曲线如

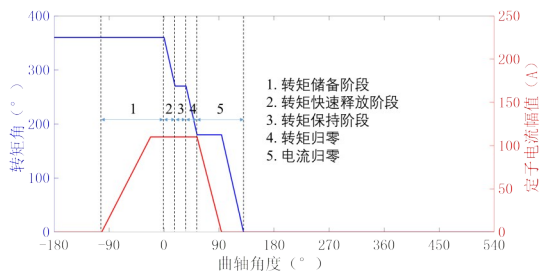


图5 电流控制策略

Fig.5 Current control strategy

图6所示。可以看出,在转矩储备阶段电流幅值增大但转矩保持为零;在转矩释放阶段和转矩归零阶段,电流矢量保持不变且电机转矩实现了快速的增大和减小。

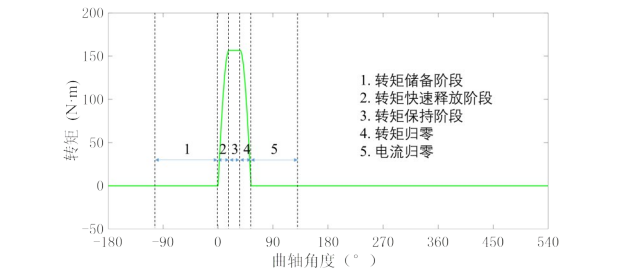


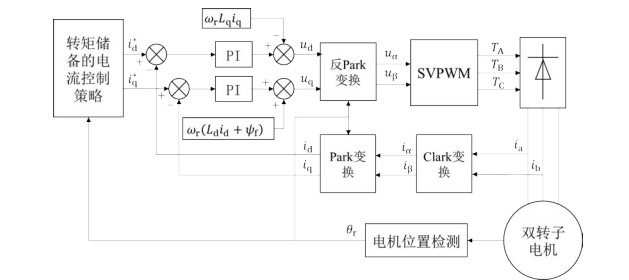
图6 一个工作循环内的转矩变化
Fig.6 Variation of the torque within one operating cycle

3 仿真分析及实验验证

3.1 仿真分析

基于传统永磁电机的FOC控制框架搭建了计及转矩储备的双转子电机的控制框架,如图7所示。为了改善转矩的动态控制效果,模型加入了电压前馈项。在Simulink中搭建了计及转矩储备的双转子电机仿真模型,其中双转子电机的基本电磁参数见表1。

分析了转速3000 r/min和目标转矩155 N·m时,转矩储备控制模型一个工作循环下的仿真结果。图8所示为定子交、直流电流的变化情况。由于所



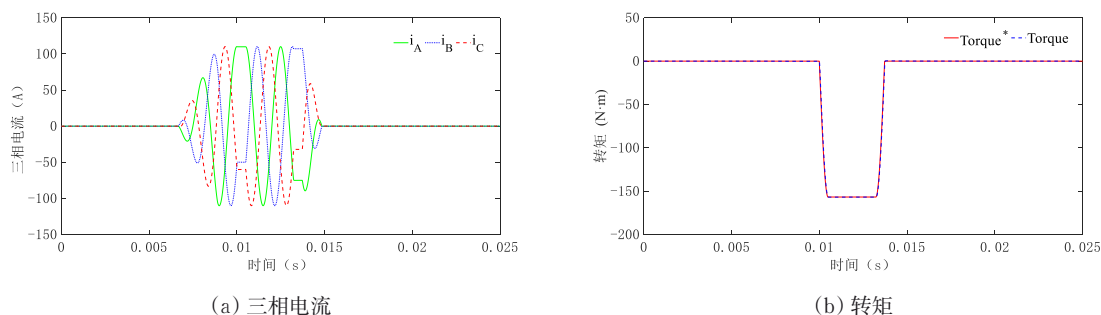


图9 三相电流及转矩的仿真结果

Fig.9 Simulation results of three-phase current and torque

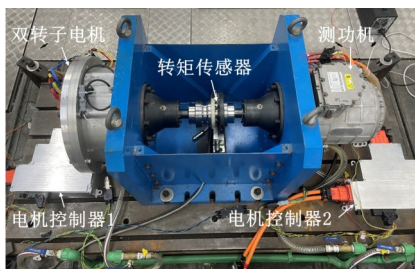


图10 实验测试台架

Fig.10 Experimental platform

一个电流工作循环内三相电流的变化如图12所示。可以看出在0.270~0.470 s时转矩储备阶段三相电流增大;在0.047~0.050 s时转矩输出阶段三相电流为直流;在0.500~0.670 s时转矩保持阶段三相电流的幅值不变;在0.067~0.070 s时转矩归零阶段三相电流为直流。

实验中当双转子电机侧的转矩动态变化时,由于测功机侧的转矩变化速率慢,造成测试系统中转速的变化。所以实验中双转子电机实际的转矩输出应该由两部分组成,一部分为转矩传感器测得的转矩,另一部分扭矩造成了转速的突变,转化为转子的动能。对应的双转子电机实际转矩表达式为

$$t_e = t_{\text{mea}} + M = t_{\text{mea}} + J\alpha \quad (12)$$

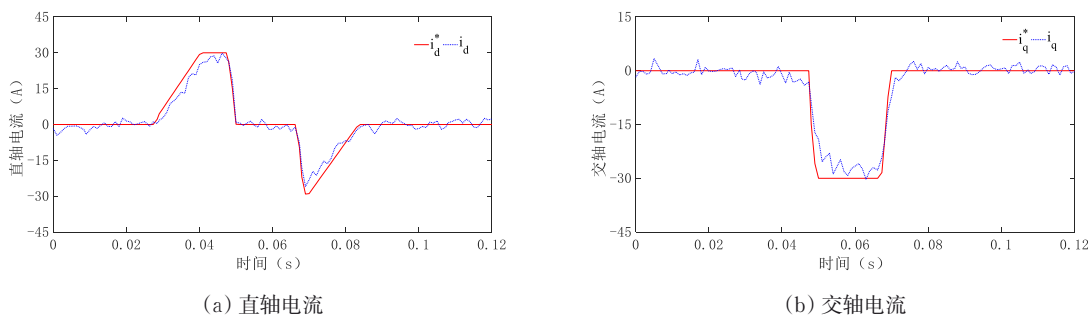


图11 交、直轴电流的实验结果

Fig.11 Experimental results of the direct and quadrature axis current

式中: t_{mea} 为转矩传感器测得的轴上转矩变化, M 为转子扭矩, J 为转子的转动惯量, α 为角加速度。

双转子电机转速的变化曲线如图13所示。在转矩增大的瞬间系统转速降低,在转矩减小的瞬间系统转速增大。

根据转速的变化曲线来计算角加速度,从而计算出转子的动能,再与扭矩传感器测量得到的转矩叠加可以得到转矩的动态变化曲线,如图14所示。可以看出,采用所提出的转矩储备控制策略可以实现转矩的快速动态变化。

4 结论

本文提出了一种计及转矩储备的双转子电机控制策略。首先基于双转子电机的数学模型推导了转矩空间变化率与矩角特性之间的关系,结果表明当定子电流矢量不变,通过转子机械角度的变化可以实现转矩的动态变化。基于该结论,以平衡发动机转矩为背景,参考单缸四冲程发动机一个工作周期内转矩的变化规律,制定了计及转矩储备的电流控制策略。具体来说,在转矩快速变化之前预先加载电流到设定值,在转矩需要快速变化时保持定子电流矢量恒定,通过转子的旋转带动转矩角的变化实

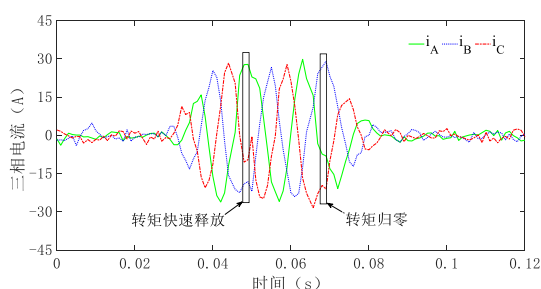


图12 三相电流的实验

Fig.12 Experimental results of three-phase current

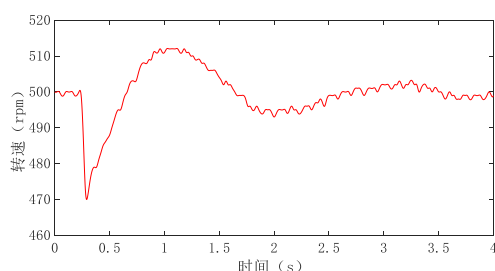


图13 电机转速

Fig.13 Motor speed

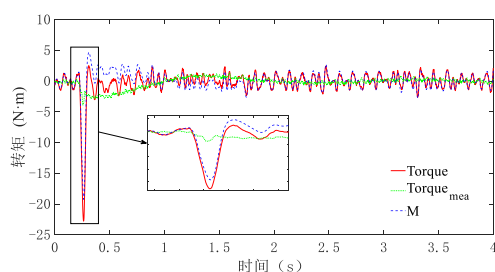


图14 转矩曲线的实验结果

Fig.14 Experimental results of torque curve

现转矩的快速变化,避免了绕组电感对转矩快速变化的影响。最后,搭建了仿真模型和实验台架,通过仿真和实验证明了所提出的控制策略的正确性和可行性。

参考文献:

- [1] ZHAO J, GUAN X, LI C, *et al.* Comprehensive evaluation of inter-turn short circuit faults in PMSM used for electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 22(1):611.
- [2] KONG Y, LIN M, JIA L. A novel high power density permanent-magnet synchronous machine with wide speed range [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2020, 56(2):1.
- [3] 夏臻荣, 王浩陈, 韦汉培, 等. PMSM DTC 转矩响应性能的仿真分析[J]. 河北科技师范学院学报, 2013, 27(3): 59.

XIA Zhenrong, WANG Haochen, WEI Hanpei, *et al.* Simulation and analysis of the torque response performance for PMSM DTC [J]. Journal of Hebei Normal University of Science & Technology, 2013, 27(3): 59.

- [4] 卢秉娟, 姬宣德, 葛运旺. 基于转矩角控制的异步电动机 SVM-DTC 系统[J]. 微特电机, 2014, 42(3): 61.
- LU Bingjuan, JI Xuande, GE Yunwang. Direct torque control system for induction motor with space vector modulation based on torque angle control [J]. Small & Special Electrical Machines, 2014, 42(3): 61.
- [5] MENG L, YANG X. Comparative analysis of direct torque control and DTC based on sliding mode control for PMSM drive[C]//2017 29th Chinese Control and Decision Conference (CCDC). Chongqing: IEEE, 2017: 736.
- [6] 王珏, 黄守道, 高剑, 等. 电动车用 PMSM 的快速转矩电流响应控制方法[J]. 微特电机, 2015, 43(1): 54.
- WANG Jue, HUANG Shoudao, GAO Jian, *et al.* A fast torque current response control of PMSM for electric vehicle [J]. Small & Special Electrical Machines, 2015, 43(1): 54.
- [7] 肖杨柳, 周腊吾, 黄守道, 等. 基于自适应模糊 PI 的 PMSM 定子电流最优控制[J]. 电力电子技术, 2010, 44(4): 45.
- XIAO Yangliu, ZHOU Lawu, HUANG Shoudao, *et al.* The optimum current vector control of permanent magnet synchronous motor based on self-adaptive fuzzy PI [J]. Power Electronics, 2010, 44(4): 45.
- [8] 王伟华, 肖曦. 永磁同步电机高动态响应电流控制方法研究 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(21): 117.
- WANG Weihua, XIAO Xi. A Current control method for permanent magnet synchronous motors with high dynamic performance [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33 (21): 117.
- [9] WANG Y, XIE W, WANG X, *et al.* Fast response model predictive torque and flux control with low calculation effort for PMSMs [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019:99:1.
- [10] 杨秀芹, 姚海燕, 邹开凤. 基于最优控制的永磁同步电机伺服系统设计[J]. 工业仪表与自动化装置, 2013, 232(4): 66.
- YANG Xiuqin, YAO Haiyan, ZOU Kaifeng. Design of permanent magnet synchronous motor servo system based on the optimal control [J]. Industrial Instrumentation & Automation, 2013, 232(4): 66.
- [11] 钟再敏, 王业勤. 电机模型中牵连运动及其动生电动势的数理表达[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(1): 30.
- ZHONG Zaimin, WANG Yeqin. Mathematical description of entrainment motion of reference frame and its electromotive force in motor modeling: [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(1): 30.
- [12] 钟再敏. 车用驱动电机原理与控制基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 2020.
- ZHONG Zaimin. Principle and control fundamentals of vehicle drive motor [M]. Beijing: China Machine Press, 2020.