

少稀土组合励磁永磁无刷电机设计与分析*

吴伟强, 朱孝勇, 项子旋, 全 力

(江苏大学 电气信息工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘 要: 基于采用稀土永磁和非稀土永磁组合励磁的磁钢结构, 提出了一种并联磁路型的少稀土组合励磁永磁无刷电机。介绍了该电机的拓扑结构及运行原理, 并在此基础上结合电机功率尺寸方程和励磁源等效方法, 给出了电机的初始设计方法并优化确定了相关的设计参数。利用有限元方法深入分析了电机在空载和额定负载条件下的电磁性能。加工了 1 台 5 kW 样机, 搭建试验平台进行了相关的试验, 结果表明了该电机拓扑结构和优化设计方法的有效性。

关键词: 少稀土; 组合励磁; 永磁无刷电机; 有限元分析

中图分类号: TM 302 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2018)09-0073-06

Design and Analysis of a Less-Rare-Earth Permanent Magnet Brushless Motor with Hybrid Permanent Magnets*

WU Weiqiang, ZHU Xiaoyong, XIANG Zixuan, QUAN Li

(School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: According to the co-excitation of rare-earth and non-rare-earth permanent magnets, a less-rare-earth permanent magnet brushless motor with hybrid permanent magnets was proposed. Details of the topology and operation principle of the proposed motor were introduced. Then, based on the electromagnetic formula and excitation sources equivalence method, the initial design method and the corresponding design parameters of the motor were determined. And, the electromagnetic performances under the conditions of no-load and rated load were investigated by the finite element analysis. The corresponding experiments of the 5 kW prototype were conducted. Both theoretical analysis and experimental results verified the effectiveness of the proposed motor and the optimization design method.

Key words: less-rare-earth; hybrid permanent magnets; permanent magnet brushless motor; finite element analysis

0 引 言

为了满足电动汽车驱动电机所需的高转矩密度、高效率和高可靠性等要求, 采用稀土永磁材料的永磁无刷电机 (Permanent Magnet Brushless Motor, PMBLM) 在电动汽车上获得了广泛应用。然而, 稀土永磁材料 (如钕铁硼) 随着市场垄断和过量消耗, 其价格变动和不稳定的供应链对稀土 PMBLM 增加了潜在的应用风险^[1-4]。

为了减缓稀土永磁材料的消耗, 国内外研究学者对感应电机和开关磁阻电机应用于电动汽车上的可行性进行了大量研究工作^[5-8]。例如美国特斯拉 Model S 上的感应电机采用铜心转子获得了较高的性能, 但也使电机的加工制造技术难度增加, 导致成本上升。对于开关磁阻电机, 其较大的转矩脉动也在一定程度上限制了该类电机在电动汽车上的广泛应用。另一方面, 一些研究学者将目光转向了采用非稀土永磁材料 (如铁氧体)

* 基金项目: 国家自然科学基金项目 (51477069, 51777089)

作者简介: 吴伟强 (1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电动汽车用少稀土永磁电机。

朱孝勇 (1975—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电动汽车驱动控制、新型电机设计与控制。

项子旋 (1987—), 男, 研究方向为无刷化双转子磁通切换电机及其控制技术。

的 PMBLM。文献[9]提出了一种轮辐式铁氧体 PMBLM,通过采用大量非稀土铁氧体材料并结合聚磁作用来提升转矩密度。文献[10]系统比较了铁氧体 PMBLM 和丰田普锐斯电机的平均转矩和最大功率等性能。为了克服非稀土铁氧体低剩磁的缺点,文献[11]提出了一种轴向磁通盘式转子永磁电机来提高转矩密度与改善抗去磁能力。一般而言,非稀土铁氧体永磁电机的转矩密度和功率密度偏低,通常需要采用一些特殊设计来提升电机性能,从而使其能与稀土永磁电机相近。

近年来,一种新的少稀土组合励磁 PMBLM 成为了研究热点^[12-14]。该类电机采用稀土永磁和非稀土永磁 2 种材料共同励磁的方式,减少了稀土永磁材料的用量。由于不同的永磁材料用量和相对位置等对该类电机的性能有显著影响,因此,通过系统地优化设计了一种少稀土组合励磁 PMBLM,使其驱动性能不仅能满足高转矩密度等要求而且能有效降低稀土永磁用量,具有较大的挑战性。

本文的主要目的为设计一种并联主磁路结构的少稀土组合励磁 PMBLM,其主要特点是转子磁钢采用稀土永磁和非稀土永磁共同励磁。文中首先讨论了该电机的拓扑结构与运行原理,然后对其参数进行优化设计并详细分析了电机的磁场分布、反电势波形、转矩等电磁性能。最后,制造了 1 台试验样机,进行了电机性能的试验分析,验证了该电机设计方法的有效性。

1 电机结构与工作原理

1.1 电机拓扑结构

图 1 所示为少稀土组合励磁 PMBLM 的拓扑结构图。该电机采用 12 槽 10 极的极槽配合,定子绕组采用模块化分数槽集中式绕组。转子磁钢采用稀土钕铁硼和非稀土铁氧体两种永磁材料作为励磁源共同励磁,其中钕铁硼永磁磁钢采用 V 型聚磁结构,铁氧体永磁磁钢采用轮辐状结构。这两种永磁磁钢均采用交替切向充磁方式,从而实现两种永磁磁钢主磁路的并联。对于磁钢结构而言,一方面采用稀土永磁磁钢与铁氧体端部直接相连的结构,有效省略了两种永磁磁钢连接处的隔磁措施,降低了电机加工制造的难度;另一方面,采用稀土永磁磁钢在外、非稀土铁氧体磁钢在

内的转子结构布局,可充分利用电机的内部空间,有效地增加铁氧体的用量,使得电机的转矩输出能力提高。此外,通过在电机转子外表面上开槽的方式,有效过滤了部分低次谐波,降低电机的定位力矩。

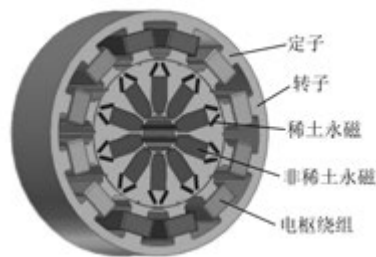


图 1 少稀土组合励磁 PMBLM 的拓扑结构

1.2 电机工作原理

图 2 所示为电机的磁力线示意图,转子磁钢的充磁方向也在图中标出。可以看出,该电机磁路结构与传统稀土 PMBLM 相似,都由转子磁钢向气隙提供有效磁通,通过定子形成磁通回路。但该电机由于采用稀土永磁和非稀土永磁共同励磁的并联主磁路结构,因此磁路不仅包含稀土永磁所产生的有效磁通,也包含非稀土永磁所产生的有效磁通。另外,该电机特殊的磁钢结构使得少数的磁通回路会通过两种永磁材料形成串联磁路,对非稀土永磁材料的抗去磁能力有一定的提升。

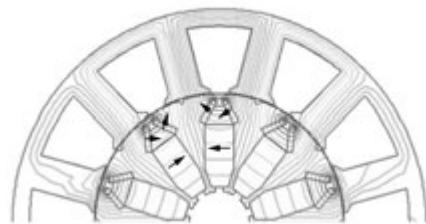


图 2 电机空载磁力线分布

2 电机优化设计

2.1 电机基本设计尺寸

由于少稀土组合励磁 PMBLM 与单一永磁励磁的稀土永磁电机基础结构上的相似性,其基本运行原理和电机基本设计理论仍与稀土永磁电机设计理论是相似的^[15]。随着多励磁源的引入,使得电机的设计与稀土永磁电机设计理论有一

定的区别。

根据永磁电机的基本尺寸方程,少稀土组合励磁 PMBLM 尺寸方程可表示为

$$D_{il}^2 L = \frac{60P}{\pi^2 k_w \sigma \alpha_i n A B_\delta} \quad (1)$$

式中: D_{il} ——电机定子内径;

L ——电机轴长;

P ——电机额定功率;

k_w 、 σ ——绕组因数和漏磁系数;

α_i ——极弧系数;

n ——电机额定转速;

A ——电负荷;

B_δ ——气隙磁密基波幅值,与稀土钕铁硼和非稀土铁氧体的磁钢工作点密切相关。

对于少稀土组合励磁永磁电机而言,其定子结构的设计可采用稀土永磁电机的设计方法。从转子来看,由于转子磁钢采用组合永磁材料励磁的形式作为励磁源,从能量交换的角度来看其与单一永磁材料励磁源的作用一致,因此可根据励磁源等效原则来分析该类永磁电机。为便于说明,相关的转子设计参数如图 3 所示。假设稀土钕铁硼和非稀土铁氧体的磁钢工作点分别为 B_{mR} 和 B_{mF} ,则该电机每极下的磁通为

$$\Phi_\delta = \sigma (B_{mR} \cdot w_R L + B_{mF} \cdot w_F L) \quad (2)$$

式中: w_R 、 w_F ——稀土钕铁硼和非稀土铁氧体的宽度。

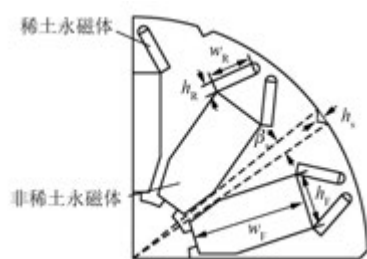


图3 转子参数化模型

由于该电机结构上采用并联磁路结构,其稀土钕铁硼和非稀土铁氧体的磁动势理论上应相等,因此可得

$$\begin{aligned} F_m &= H_{mR} \cdot 2h_R = H_{mF} \cdot h_F = \\ \frac{B_{rR} - B_{mR}}{\mu_0 \mu_R} \cdot 2h_R &= \frac{B_{rF} - B_{mF}}{\mu_0 \mu_F} \cdot h_F \end{aligned} \quad (3)$$

式中: H_{mR} 、 h_R ——稀土钕铁硼的磁场强度和厚度;

H_{mF} 、 h_F ——非稀土铁氧体的磁场强度和厚度;

B_{rR} 、 B_{rF} ——稀土钕铁硼和非稀土铁氧体的剩磁;

μ_0 ——真空磁导率;

μ_R 、 μ_F ——稀土钕铁硼和非稀土铁氧体的相对磁导率。

综上所述,该电机的磁通和磁通势与永磁材料的工作点和尺寸密切相关,从而影响其电磁性能。但在实际设计过程中,两种永磁材料之间也会由于尺寸和相对位置等引起耦合作用,对永磁材料工作点有一定的影响,从而影响其电磁性能。因此,为了使少稀土组合励磁永磁电机获得相对较优的电磁性能,需要合理地设计两种永磁材料的用量、尺寸及相关参数。

2.2 电机参数优化

电动汽车是该类电机潜在的应用背景。考虑到频繁的加减速和爬坡工况,需要将输出转矩作为一个基本的优化目标。另外,为了提升稳定性和舒适性,转矩脉动和定位力矩也作为优化目标。该电机主要的优化参数如图 3 所示,包括稀土永磁宽度和厚度、非稀土永磁宽度和厚度及转子槽开口等。

为了快速有效地确定该电机相应的设计参数,采用单参数扫描法获得合适的参数值使电机的电磁性能能够满足要求。本文以稀土钕铁硼和非稀土铁氧体永磁厚度对电机输出转矩、转矩脉动及定位力矩的影响为例进行分析,其结果分别如图 4、图 5 所示。从图 4 中可以看出,随着稀土永磁厚度的增加,输出转矩基本线性增加,转矩脉动总体上有所下降,定位力矩变化趋势与之相反。综合权衡转矩性能的指标,选取稀土永磁厚度为 2.8 mm。从图 5 可以看出,随着非稀土永磁厚度的增加,输出转矩先增加后略微减小,转矩脉动和定位力矩总体上有所下降的趋势,因此,选取非稀土永磁厚度为 14 mm。

通过单参数扫描法对其他参数也进行了类似的优化并确定相应的参数值,最终可以确定所设计的少稀土组合励磁 PMBLM 的关键尺寸参数的设计值,如表 1 所示。

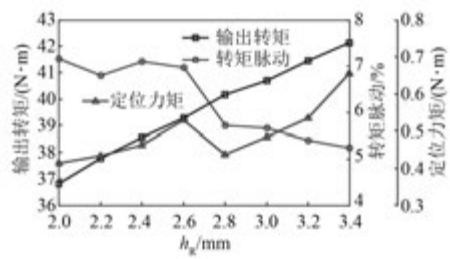


图4 稀土永磁厚度对转矩性能的影响

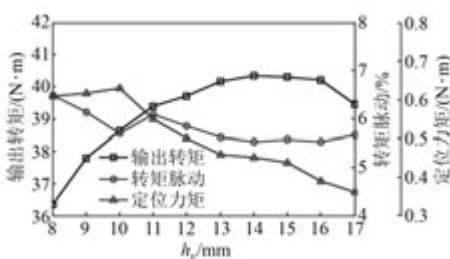


图5 非稀土永磁厚度对转矩性能的影响

表1 电机结构参数

参数名称	设计值	参数名称	设计值
额定功率 P/kW	5	稀土永磁厚度 h_R/mm	2.8
额定转速 $n/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	1 200	稀土永磁宽度 w_R/mm	11
额定转矩 $T/(\text{N}\cdot\text{m})$	40	非稀土永磁厚度 h_F/mm	14
定子极数 p_s	12	非稀土永磁宽度 w_F/mm	30
转子极数 p_r	10	转子槽开口角度 $\beta_s/(\text{^\circ})$	4
定子外径 D_i/mm	200	转子槽高度 h_s/mm	2
定子内径 D_{i1}/mm	121	定子轭宽 w_{sy}/mm	8
转子外径 D_{r1}/mm	120	定子齿宽 w_{st}/mm	16
转子内径 D_{r2}/mm	29	电机轴长 L/mm	68
气隙 g/mm	0.5	每相每槽绕组匝数 N_s	24

2.3 电磁性能分析

在对电机进行优化并确定其结构尺寸参数后,利用有限元分析方法对该电机的电磁性能进行深入分析。

首先分析了该电机在空载条件下的空载磁场特性。图6所示为该电机在空载条件下的磁通密度云图。从图6中可以看出,该电机转子上的局部位置出现了轻微饱和现象,但是转子总体和定子齿部等处磁密基本不超过1.5 T,表明该电机空载磁场分布基本合理。图7所示为该电机的气隙磁密变化波形,可知气隙磁密的峰值达到约1.1 T,与稀

土永磁电机的气隙磁密相近。为了进一步反映该电机的空载特性,对空载反电动势波形进行仿真分析,其波形如图8所示。从图8可知,空载反电动势三相对称且幅值相等,峰值达到107 V。

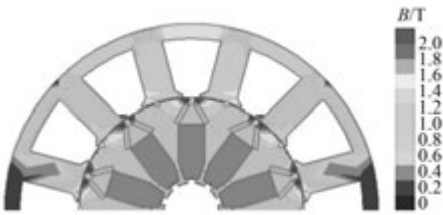


图6 电机磁通密度云图

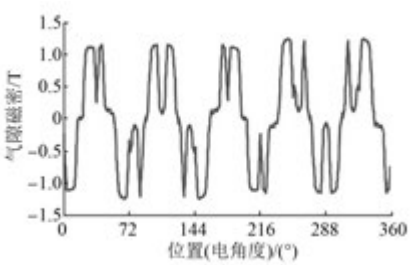


图7 气隙磁密波形

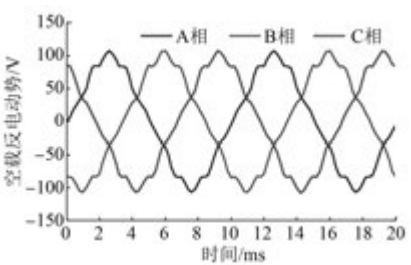


图8 三相空载反电动势波形

然后分析了该电机在额定负载下的电磁性能。当电枢绕组加入峰值为40 A的额定正弦电流时,该电机的输出转矩性能如图9所示。从图9可以看出,该电机能够输出的平均转矩为40.2 N·m,转矩脉动为5.7%。此外,定位力矩为0.43 N·m。图10所示为该电机在额定负载下永磁磁钢工作点在1个电周期内的变化波形。从图10可以看出两种永磁材料的工作点变化规律相似。稀土钕铁硼的工作点在0.78~0.97 T波动,总体相对较高,因此该电机的稀土钕铁硼永磁有较高的利用率。非稀土铁氧体的工作点在0.22~0.29 T波动,仍然大于铁氧体永磁的退磁拐点(0.2 T),表明该电机能够合理利用大量非稀土铁氧体永磁材料。

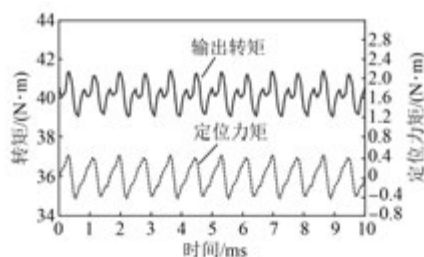


图9 电机输出转矩与定位力矩波形

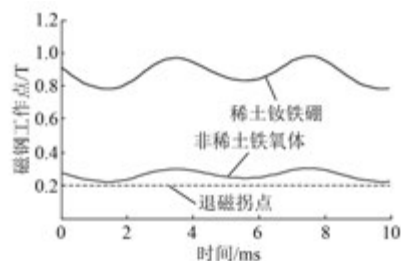


图10 稀土永磁和非稀土永磁工作点波形

3 试验验证

为了进一步验证该永磁电机结构设计的合理性,研制加工了1台额定功率为5 kW的样机,并进行了相关的试验验证。电机的硅钢片和样机如图11所示。相应的试验台架由电机、动态转矩转速传感器及磁粉制动器等构成。



图11 电机的硅钢片和样机

考虑到电机空载反电动势直观表明电机理论仿真和试验结果的差异性,因此对该电机的空载反电动势进行了测试。图12所示为电机在转速为750 r/min时的三相空载反电动势试验波形。从图12可以看出,其反电动势波形与图8中的有限元仿真结果保持一致,且三相幅值相等,相位上严格依次相差120°。由于端部效应、永磁材料理论和实际的差异、电机装配工艺等影响,理论仿真的空载反电动势值与实测值之间存在一定的误差,但总体来说,理论仿真结果和实测电机反电动势仍具有较高的一致性。

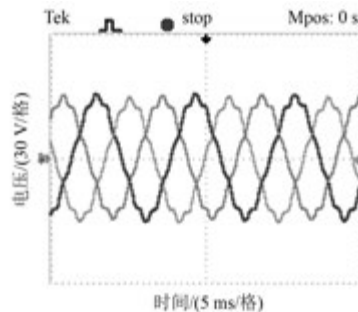


图12 电机实测空载反电动势波形

4 结语

本文提出了一种新型少稀土组合励磁PMBLM。该电机转子磁钢采用稀土钕铁硼和非稀土铁氧体两种永磁材料共同励磁,不仅降低了传统稀土永磁电机对稀土永磁材料的依赖性,并且通过合理的结构设计能获得满足要求的电磁性能。理论分析、有限元仿真及试验分析不仅验证了该方法的有效性,而且表明:通过合理的拓扑结构设计,该类电机可有效获得较高的转矩密度,在需要高转矩密度的场合具有潜在的应用前景。

【参考文献】

- [1] BOLDEA I, TUTELEA L N, PARSA L, et al. Automotive electric propulsion systems with reduced or no permanent magnets: an overview [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61 (10): 5696-5711.
- [2] CAO R W, CHRIS M, CHENG M. Quantitative comparison of flux-switching permanent-magnet motors with interior permanent magnet motor for EV, HEV, and PHEV applications [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2012, 48 (8): 2374-2384.
- [3] 唐任远. 稀土永磁电机的关键技术与高性能电机开发 [J]. 沈阳工业大学学报, 2005, 27 (2): 162-166.
- [4] 葛叶明, 朱孝勇, 陈龙. 电动汽车用定子永磁型磁通记忆式游标电机性能分析 [J]. 电机与控制应用, 2014, 41 (4): 45-51.
- [5] LYONS D, STRAUBEL J B, SHAHOIAN E, et al. Rotor design for an electric motor: US, US 20110062819 A1 [P]. 2011.
- [6] CHIBA A, KIYOTA K, HOSHI N, et al. Development of a rare-earth-free SR motor with high torque density for hybrid vehicles [J]. IEEE

- Transactions on Energy Conversion, 2015, 30 (1): 175-182.
- [7] 陈小元, 邓智泉, 许培林, 等. 整距绕组分块转子开关磁阻电机的电磁设计[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(36): 109-115.
- [8] 王毅, 马洪飞, 赵凯岐, 等. 电动车用感应电机磁场定向矢量控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(11): 113-117.
- [9] 刘万振, 刘广强, 林岩, 等. 铁氧体辅助同步磁阻电机转子优化设计[J]. 微电机, 2017, 50(2): 17-20.
- [10] CAI H, GUAN B, XU L. Low-cost ferrite PM-assisted synchronous reluctance machine for electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(10): 5741-5748.
- [11] ZHAO W, LIPO T A, KWON B I. Comparative study on novel dual stator radial flux and axial flux permanent magnet motors with ferrite magnets for traction application [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2014, 50(11): 8104404.
- [12] 潘绪前, 朱孝勇, 左月飞, 等. 定子永磁型双凸极非稀土永磁电机谐波电流抑制[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(11): 72-78.
- [13] CHEN Q, LIU G, ZHAO W, et al. Design and analysis of the new high-reliability motors with hybrid permanent magnet material[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2014, 50(12): 8207010.
- [14] LIU C, CHAU K T, JIANG J Z, et al. Design of a new outer-rotor permanent magnet hybrid machine for wind power generation [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2008, 44(6): 1494-1497.
- [15] 符荣, 窦满峰. 电动汽车驱动用内置式永磁同步电机设计与实验研究[J]. 西北工业大学学报, 2014, 32(5): 737-743.

收稿日期: 2018-02-06

(上接第 58 页)

- [4] 于飞, 张晓锋, 乔鸣忠. 基于零序信号注入的载波型多相 PWM 控制技术[J]. 电工技术学报, 2009, 24(2): 127-131.
- [5] 杨金波, 杨贵杰, 李铁才. 六相电压源逆变器 PWM 算法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(7): 205-211.
- [6] 周长攀, 苏健勇, 杨贵杰, 等. 基于双零序电压注入 PWM 策略的双三相永磁同步电机矢量控制[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(10): 2522-2533.
- [7] 史友情, 陶彩霞. 双 Y 移 30° 六相永磁同步电机谐波电流抑制技术[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(3): 90-95.
- [8] LEVI E. Multiphase electric machines for variable-speed applications [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(5): 1893-1909.
- [9] 周长攀, 杨贵杰, 苏健勇. 五桥臂逆变器驱动双三相永磁同步电机系统双零序电压注入 PWM 策略[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(18): 5043-5052.
- [10] 梅杨, 王立朋, 李正熙. 提高五桥臂逆变器电压利用率的调制策略[J]. 电工技术学报, 2013, 28(12): 207-214.

收稿日期: 2018-04-25

(上接第 64 页)

- [3] 滕福林, 胡育文, 李宏胜, 等. 基于自抗扰控制器的交流位置伺服系统[J]. 电气传动, 2011, 41(11): 46-50, 58.
- [4] 胡金高, 程国扬. PMSM 位置伺服系统的鲁棒复合非线性控制[J]. 电气传动, 2013, 43(8): 49-52.
- [5] 王继超, 杨振强. 基于细菌觅食优化算法的永磁同步电机位置伺服系统模糊控制策略[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(6): 40-44.
- [6] 曹薇, 谢天驰. 高阶非线性系统的位置控制器 PID 参数优化[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(9): 84-87.
- [7] WORKMAN M L. Adaptive proximate time optimal servo mechanisms [D]. Palo Alto: Stanford University, 1987.
- [8] DHANDA A, FRANKLIN G F. An improved 2-DOF proximate time optimal servomechanism [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(5): 2151-2164.
- [9] CHOI J W, LEE S C. Anti-windup strategy for PI-type speed controller [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(6): 2039-2046.
- [10] CHENG G Y, PENG K M. Robust composite nonlinear feedback control with application to a servo positioning system [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(2): 1132-1140.
- [11] 胡金高, 程国扬. 鲁棒近似时间最优控制及其在电机伺服系统的应用[J]. 电工技术学报, 2014, 29(7): 163-172.
- [12] LU T, CHENG G Y. Expanded proximate time-optimal servo control of permanent magnet synchronous motor[J]. Optimal Control Applications and Methods, 2016, 37(4): 782-797.
- [13] 李传江. 最优控制[M]. 北京: 科学出版社, 2011.

收稿日期: 2018-04-25