

开路故障下永磁容错轮缘推进电机直接转矩控制策略

季彦名,赵宏革*,朱景伟

(大连海事大学 船舶电气工程学院,辽宁 大连 116026)

摘要:针对轮缘推进电机的结构及特点,将六相永磁容错电机应用于轮缘推进系统中,对六相永磁容错轮缘推进电机直接转矩控制策略进行深入研究.借鉴三相永磁容错电机 SVPWM 控制策略,对电机的每一相进行磁链容错补偿,实现单相开路故障下六相永磁容错轮缘推进电机的直接转矩控制.同时,通过 MATLAB/Simulink 进行仿真,并与六相永磁容错电机 bangbang 控制策略进行对比分析,验证了基于 SVPWM 的直接转矩控制策略在开路故障下作为六相永磁容错电机容错控制方法的可行性及其独特的优越性.

关键词:永磁容错轮缘推进电机;容错控制;直接转矩;SVPWM

中图分类号:N945;TM34

文献标志码:A

Direct torque control strategy of permanent magnet fault-tolerant rim driven motor under open circuit fault

Ji Yan-ming, ZHAO Hong-ge*, ZHU Jing-wei

(Marine Electrical Engineering College,
Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: Aiming at the structure and characteristics of the rim driven motor (RDM), the six-phase fault-tolerant permanent magnet motor (FTPMM) was applied in the rim driven system to deeply study the direct torque control (DTC) strategy of the six-phase permanent magnet fault-tolerant rim propulsion motor. By referring the SVPWM control strategy of three-phase permanent magnet fault-tolerant motor, the flux linkage fault-tolerant compensation was carried out for each phase of the motor to realize the direct torque control of six-

phase permanent magnet fault-tolerant wheel-rim propulsion motor under single-phase open-circuit fault. At the same time, the simulation was carried out by using MATLAB/Simulink to compare with the bangbang control strategy of six-phase permanent magnet fault-tolerant motor, which verified the feasibility and unique superiority of direct torque control strategy based on SVPWM as the fault-tolerant control method of six-phase permanent magnet fault-tolerant motor under open circuit fault.

Key words: permanent magnet fault tolerant rim driven motor; fault tolerant control; direct torque; SVPWM

0 引言

随着海上贸易的飞速发展,人们对船舶吨位的要求越来越高,应运而生的是吊舱推进器,而轮缘推进电机是一种新型的高性能吊舱式推进器^[1-2]. 永磁同步电机具有运行效率高等优点,在船舶推进器中获得广泛应用. 但是永磁同步电机不具有故障容错能力,限制了其在船舶推进器中的应用^[3]. 永磁容错电机 (Fault-Tolerant Permanent Magnet, FTPMM) 是多相永磁同步电机的一种,除具有传统永磁电机效率高、噪声低、体积小等优点,还具有较高的可靠性. 将 FTPMM 与轮缘推进器结合,构成舰船推进器用永磁容错轮缘推进电机 (Fault-Tolerant Permanent Magnet Rim Drive Motor, FTPM-RDM).

直接转矩控制 (Direct Torque Control, DTC)

收稿日期:2019-06-05;修回日期:2019-07-05.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51777024);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(3132019015).

作者简介:季彦名(1993-),男,硕士生,E-mail:jym09080@126.com;赵宏革*(1967-),男,博士,教授,博士生导师,E-mail:zhaohg@dlmu.edu.cn.

技术是继矢量控制技术后发展起来的电机控制技术,与矢量控制技术相比,结合 SVPWM 技术的电机 DTC 策略具有控制算法简单、动态性能好的优点^[4]. 对于 DTC 技术,文献[5]仅对双 Y 移 30° 永磁容错电机进行了分析,控制过程较简单. 文献[6]对传统 bangbang 控制进行了详细研究,但是仅考虑永磁同步电机并没有涉及 SVPWM. 文献[7]对五相永磁同步电机 SVPWM 控制进行了详细研究,但是与六相 FTPMM 仍有本质区别.

传统三相永磁容错电机 DTC 只应用到 8 个基本空间电压矢量^[8],控制较为简单;而六相 FTPMM 由于其独立的 H 桥驱动拓扑,可选择的空间电压矢量则有 729 种之多^[9],众多的空间电压矢量合成方式没有唯一性,挑选非常复杂. 在对六相 FTPM-RDM 使用 SVPWM 时,如果仍参照传统三相永磁容错电机 SVPWM 控制会异常困难. 为降低难度,应该从每一相空间电压矢量入手,因此,本文提出将磁链及补偿分散到每一相中对电机进行控制. 首先,对 FTPM-RDM 的基本结构及数学模型进行研究;然后,对基于 SVPWM 的 DTC 工作原理进行深入分析,提出了电机开路故障磁链补偿方法;最后,通过仿真验证了将 DTC 策略应用于 FTPM-RDM 控制中的可行性.

1 FTPM-RDM 的结构及数学模型

目前,轮缘推进电机内置集成电机主要为无刷直流电机和永磁同步电机^[9-13],而永磁容错电机既具有容错能力又具有体积小等优点,因此本文将永磁容错电机集成到轮缘推进器中. 图 1 为永磁容错轮缘推进电机结构示意图.

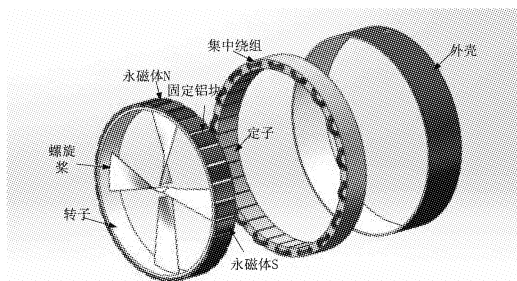


图 1 永磁容错轮缘推进电机结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of FTPM-RDM

本文中,FTPM-RDM 本质上是一种特殊设计的六相永磁同步轮缘推进电机,它将常规轮缘推

进电机的“集成化”思想与永磁容错电机的“冗余”、“故障隔离”、“故障可控”思想相结合得到一种新型拓扑结构的永磁容错轮缘推进电机^[14],其槽数为 36,极对数为 15. 在满足一般 RDM 设计要求的同时采用集中式绕组,每相绕组间有隔离齿,每相绕组最少需要两个槽. 六相永磁同步轮缘推进电机把螺旋桨焊接在转子环内侧,中间无轮毂,以此增大海水过流面^[15],相比传统永磁电机,气隙扩大了 2~3 倍. 此外,螺旋桨带动水流进入大气隙,在润滑滑动轴承的同时,带走了绕组产生的热量^[16-17],因此,电机具有较高的电密. 绕组产生的热量通过定子表面传递到海水中,每相绕组由独立的 H 桥供电,实现了物理、磁、热、电气隔离^[18-19].

本文使用的永磁容错轮缘推进电机各相的互感较小,不计入考虑范围,电机每相均采用独立的 H 桥结构,每相绕组之间不存在磁耦合及连接,各相绕组 H 桥驱动如图 2 所示.

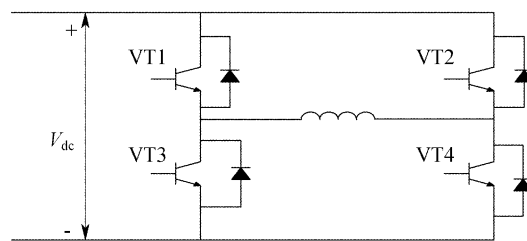


图 2 H 桥驱动拓扑结构

Fig. 2 Topology of H-bridge

在建立永磁容错轮缘推进电机数学模型时,假设:(1)忽略电机铁心剩磁、涡流损耗;(2)电机各绕组对称分布;(3)磁钢无阻尼作用,忽略定子表面齿、槽影响. 可以得出,六相永磁容错电机在静止坐标系下的磁链方程为:

$$\psi_s = L_s I_s + \psi_f f_s(\theta) \quad (1)$$

电压方程为:

$$U_s = R_s I_s + \frac{d}{dt} \psi_s \quad (2)$$

电磁转矩方程为:

$$T_e = \frac{e_A i_A + e_B i_B + e_C i_C + e_D i_D + e_E i_E + e_F i_F}{\omega} \quad (3)$$

运动方程为:

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega}{dt} \quad (4)$$

$$\Delta\psi_{sj} = \psi_{sj(k+1)}^* - \psi_{sj(k)} \quad (9)$$

式中: ψ_{sj} 为电机定子磁链幅值,可由式(1)计算得到。

再由绕组端电压方程,忽略定子电阻,可得施加在各相绕组上的非零电压矢量作用时间 Δt :

$$\Delta t = \frac{\Delta\psi_{sj}}{u_j} \quad (10)$$

式中: u_j 为空间电压矢量幅值,有 $+V_{DC}$ 、 $-V_{DC}$ 和 0 三种情况,具体由 $\Delta\psi_{sj}$ 决定:

$\Delta\psi_{sj} > 0$ 时,该相绕组此时施加正电压矢量, $u_j = +V_{DC}$; $\Delta\psi_{sj} < 0$ 时,该相绕组此时施加负电压矢量, $u_j = -V_{DC}$; $\Delta\psi_{sj} = 0$ 时,该相绕组此时施加零电压矢量, $u_j = 0$ 。

因此,可进一步求得零电压矢量作用时间 Δt_{j0} :

$$\Delta t_{j0} = T_s - \Delta t \quad (11)$$

如果得到的非零电压矢量的控制时间大于 T_s ,则非零电压矢量的作用时间为整个周期,零电压矢量的作用时间为零。

2.3 开路故障磁链补偿方法

开路故障是 FTPM-RDM 的常见故障,本文对开路故障的磁链补偿策略进行研究.假设电机 A 相发生开路故障,其绕组电流为 0,磁链只剩下 ψ_{fA} ,其故障状态下的磁链必定会发生变化,因此,需要对故障相的磁链进行补偿.使用其他剩余五相正常相的磁链对故障相进行补偿,具体补偿方式如图 5 所示。

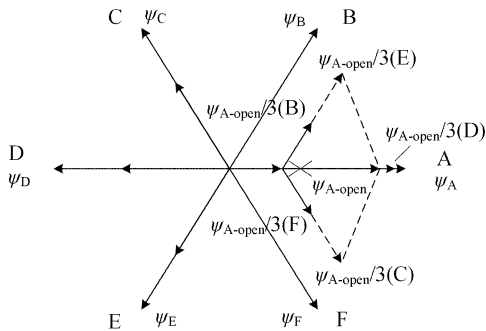


图5 A相开路情况下磁链补偿矢量图

Fig.5 Magnetic flux compensation for A phase open

当第 h 相绕组发生开路状况时,所需补偿的定子磁链表示为:

$$\psi_{sj(k+1)-open}^* = |\psi_s|^* \cos(\theta_s + \Delta\delta(k+1) - \frac{h-1}{3}\pi) - \psi_f \cos(\theta_r - \frac{h-1}{3}\pi) \quad (12)$$

式中: ψ_f 为永磁体磁链; θ_r 为转子电角度。

由图 5 分析可知,除去故障相,剩余正常相绕组需要承担的补偿磁链为 $\psi_{sj(k+1)-open}^*/3$,因此,A 相绕组发生开路故障时,剩余相绕组定子磁链如表 1 所示。

表1 A相故障时各相补偿后磁链值

Tab.1 The flux value of each phase after A phase open

六相绕组	A相故障时 磁链值	补偿 磁链值	补偿后 磁链值
A	/	/	/
B	ψ_B	$+\psi_{A-open}/3$	$\psi_C + \psi_{A-open}/3$
C	ψ_C	$-\psi_{A-open}/3$	$\psi_C - \psi_{A-open}/3$
D	ψ_D	$-\psi_{A-open}/3$	$\psi_D - \psi_{A-open}/3$
E	ψ_E	$-\psi_{A-open}/3$	$\psi_E - \psi_{A-open}/3$
F	ψ_F	$+\psi_{A-open}/3$	$\psi_F + \psi_{A-open}/3$

3 仿真实验

3.1 无故障状态仿真分析

本文利用 MATLAB/Simulink 建立永磁容错轮缘推进电机直接转矩控制的仿真模型,其各项参数如下:极对数 $n_p = 15$;定子电阻 $R_s = 0.89921 \Omega$;电感 $L_d = L_q = 0.02568 \text{H}$;直流母线电压 $V_{dc} = 170 \text{V}$; $J = 0.05 \text{kg} \cdot \text{m}^2$;负载转矩 $T_L = 10 \text{N} \cdot \text{m}$;额定转矩 $T = 23.87 \text{N} \cdot \text{m}$;额定转速 $n = 600 \text{r/min}$; $\psi_f = 0.5 \text{Wb}$;额定功率 $P = 1.5 \text{kW}$ 。

系统在正常状态运行时,先使用没有对磁链进行补偿的直接转矩控制对电机进行仿真,得到基于 SVPWM 的直接转矩控制在正常状态时的六相转矩波形、电流波形、转速波形,如图 6—图 8 所示。

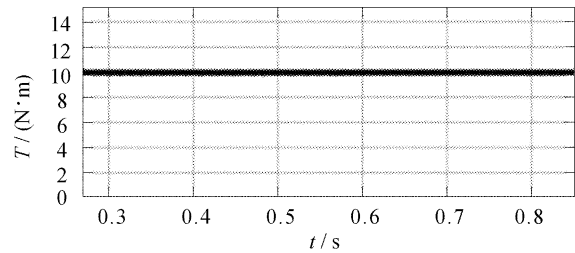


图6 正常状态时 SVPWM-DTC 转矩波形

Fig.6 SVPWM-DTC torque waveform in normal state

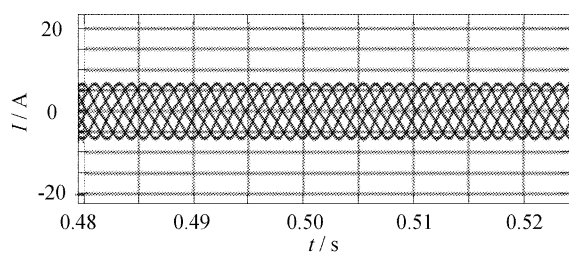


图 7 正常状态时 SVPWM-DTC 电流波形

Fig. 7 SVPWM-DTC current waveform in normal state

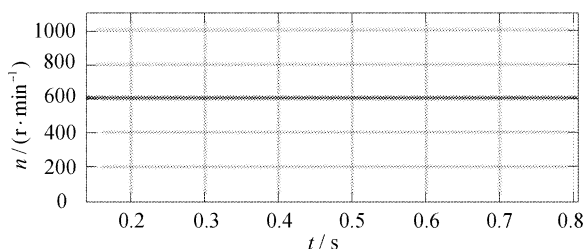


图 8 正常状态时 SVPWM-DTC 转速波形

Fig. 8 SVPWM-DTC speed waveform in normal state

3.2 故障状态仿真分析

针对永磁容错轮缘推进电机从正常状态到突然开路状态下的运行进行仿真研究时,假定在 0.5 s 时电机 A 相绕组发生开路故障,其他参数及条件保持不变,转速 600 r/min. 首先,对电机故障状态采用传统 bangbang 控制进行仿真,所选空间电压矢量如表 2 所示. 仿真结果如图 9—图 11 所示.

表 2 空间电压矢量选择

Tab. 2 Space voltage vector selection

空间电压矢量	S_a	S_b	S_c	S_d	S_e	S_f	角度/(°)
V_1	1	1	-1	-1	-1	1	0
V_2	1	1	1	-1	-1	-1	60
V_3	-1	1	1	1	-1	-1	120
V_4	-1	-1	1	1	1	-1	180
V_5	-1	-1	-1	1	1	1	240
V_6	1	-1	-1	-1	1	1	300

在相同仿真条件下,基于 SVPWM 的 DTC 控制的仿真结果如图 12—图 14 所示.

由仿真结果可知,正常状态时采用基于 SVPWM 的直接转矩控制,磁链可稳定跑圆,转速基本稳定在 600 r/min,六相电流幅值在 6~8 A. 定义

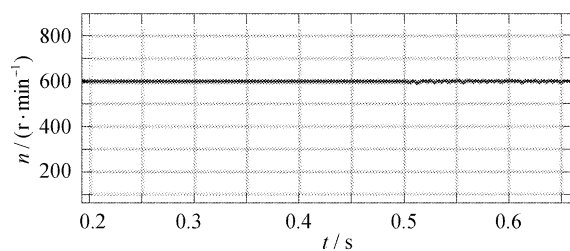


图 9 A 相开路时 bangbang 控制转速波形图

Fig. 9 Speed waveform of bangbang control when A phase open

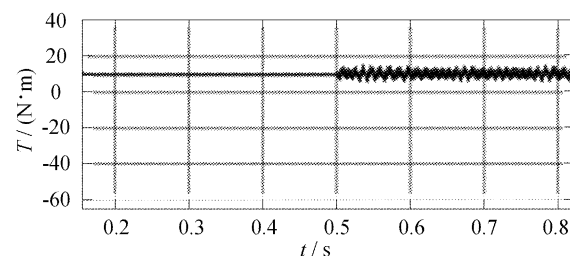


图 10 A 相开路时 bangbang 控制转矩波形图

Fig. 10 Torque waveform of bangbang control when A phase open

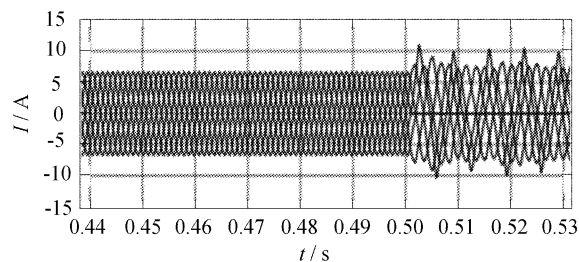


图 11 A 相开路时 bangbang 控制电流波形图

Fig. 11 Current waveform of bangbang control when A phase open

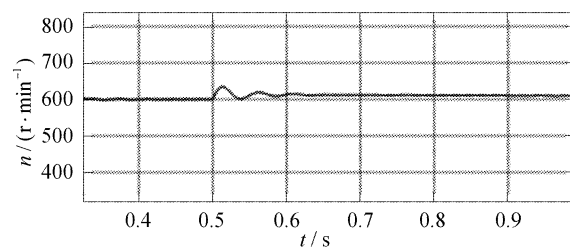


图 12 A 相开路时 SVPWM-DTC 转速波形图

Fig. 12 Speed waveform of SVPWM-DTC when A phase open

转矩脉动 $T_{pul} = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{avg}}$, 转矩脉动稳定在 5% 左右. 当 A 相绕组突然发生开路故障时,虽然采用传

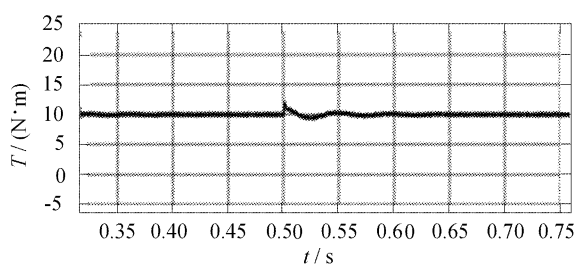


图13 A相开路时SVPWM-DTC转矩波形图

Fig. 13 Torque waveform of SVPWM-DTC when A phase open

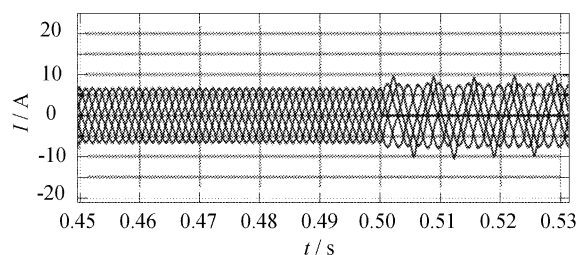


图14 A相开路时SVPWM-DTC电流波形图

Fig. 14 Current waveform of SVPWM-DTC when A phase open

统 bangbang 控制也可以实现容错效果,但故障后转矩脉动较大,并不适用于安全性要求较高的轮缘推进电机.采用基于 SVPWM 的直接转矩控制后,在补偿磁链的情况下实现容错控制,转矩脉动基本稳定在6%左右,并且逐渐趋于稳定,可得到更好地抑制转矩脉动的效果.因此,基于 SVPWM 的直接转矩具有良好的容错控制能力,能够适用于要求严格的轮缘推进电机,与上文分析结果相符.

4 结 语

本文将直接转矩控制结合在新的六相三十极永磁容错轮缘推进电机上,拓展了直接转矩控制方法的适用范围,通过仿真验证了基于 SVPWM 的直接转矩控制在正常状态下的可行性及稳定性.同时,对单相开路故障状态也使用了基于 SVPWM 的直接转矩控制算法,进行磁链补偿后,经仿真验证,转矩及转速恢复到了稳定值,电机再次进入了稳定工作状态.不论在正常状态还是在故障状态下,对永磁容错轮缘推进电机采用基于 SVPWM 的直接转矩算法控制,均可使电机更加精确,能够满足电机运行的转矩需求,达到良好的控制效果,适用于航行中的复杂环境.本文提供了一

种新的容错控制思路,不论是与传统 bangbang 控制相结合还是与滑模观测器相结合,均具有一定研究意义.

参考文献 (References):

- [1] 马伟明. 舰船综合电力系统中的机电能量转换技术[J]. 电气工程学报, 2015, 10(4): 3-10.
MA W M. Electromechanical power conversion technologies in vessel integrated power system[J]. Journal of Electrical Engineering, 2015, 10(4): 3-10. (in Chinese)
- [2] 苟婷婷, 孙丹丹, 王双虎. 环驱式集成电机推进器用永磁无刷直流电动机设计与分析[J]. 电气自动化, 2016, 38(2): 1-3.
GOU T T, SUN D D, WANG S H. Design and analysis of a permanent magnet brushless DC motor for the loop-driven integrated motor propulsor[J]. Electrical Automation, 2016, 38(2): 1-3. (in Chinese)
- [3] 肖丽, 范书瑞, 刘卫朋, 等. 基于电流分析的四相开关磁阻电机气隙偏心故障综合检测方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(6): 122-132.
XIAO L, FAN S R, LIU W P, et al. Fault detection method of air gap eccentricity for switched reluctance motors based on analysis of current[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(6): 122-132. (in Chinese)
- [4] ZHU J W, BAI H F, WANG X, et al. Current vector control strategy in a dual-winding fault-tolerant permanent magnet motor drive[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2018, 33(4): 2191-2199.
- [5] 张华强, 秦秀敬, 于亚新, 等. 双三相永磁同步电机直接转矩控制[J]. 电气传动, 2017, 47(2): 3-8.
ZHANG H Q, QIN X J, YU Y X, et al. Direct torque control for dual three phase permanent magnet synchronous motor[J]. Electric Drive, 2017, 47(2): 3-8. (in Chinese)
- [6] 罗浩源, 袁登科, 胡宗杰. 不同开关表下 PMSM 直接转矩控制性能仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(11): 4375-4386.
LUO H Y, YUAN D K, HU Z J. Simulation study on control performance of PMSM-DTC under different switching tables[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(11): 4375-4386. (in Chinese)
- [7] 刘国海, 宋成炎, 徐亮, 等. 基于 SVPWM 的五相永磁同步电机两相开路故障容错控制策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(1): 23-32.
LIU G H, SONG C Y, XU L, et al. SVPWM-based fault-

- tolerant control strategy under two-phase open circuit fault of five-phase permanent-magnet synchronous motor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(1):23-32. (in Chinese)
- [8] 白洪芬, 朱景伟. 船用永磁容错电机 CHBPWM 与 SVPWM 矢量控制的比较研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2017, 9(7):20-28.
BAI H F, ZHU J W. A comparison of CHBPWM control and SVPWM control for FTPMM applied in ship electric propulsion system[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2017, 9(7):20-28. (in Chinese)
- [9] 郝振洋, 胡育文, 沈天珉. 永磁容错电机的直接转矩控制策略[J]. 电机工程学报, 2014, 3(9):180-188.
HAO Z Y, HU Y W, SHEN T M. Direct torque control strategy of fault tolerant permanent magnet motors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 3(9):180-188. (in Chinese)
- [10] SHARKH S M, LAI S H, TURNOCK S R. A structurally integrated brushless PM motor for miniature propeller thrusters[J]. IEE Proceedings on Electric Power Applications, 2004, 151(5): 513-519.
- [11] HASSANNIA A, DARABI A. Design and performance analysis of superconducting rim-driven synchronous motors for marine propulsion[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2014, 24(1): 40-46.
- [12] 刘建波, 黄刘玮, 李耕. 机桨一体化推进电机的设计与分析[J]. 船电技术, 2012, 32(8):57-60.
LIU J B, HUANG L W, LI G. Design and analysis of integrated motor propulsor[J]. Marine Electric & Electronic Engineering, 2012, 32(8):57-60. (in Chinese)
- [13] 张晓峰, 梁京辉, 乔鸣忠, 等. 机桨一体化推进电机设计及分析[J]. 电工技术学报, 2013, 28(11):170-175.
ZHANG X F, LIANG J H, QIAO M Z, et al. Design and analysis of propelling motor used in a integrated motor propulsor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(11):170-175. (in Chinese)
- [14] MA R, ZHU J W, LIN Q H, et al. Investigation on slot and pole combination schemes for six-phase fault-tolerant permanent magnet rim driven motor[C]// IEEE Student Conference on Electric Machines and Systems. Huzhou, China: IEEE, 2018.
- [15] SONG B W, WANG Y J, TIAN W L. Open water performance comparison between hub-type and hubless rim driven thrusters based on CFD method[J]. Ocean Engineering, 2015, 103:55-63.
- [16] 钟宏伟, 韩雪, 刘亚兵. 无轴推进电机技术应用研究[J]. 舰船科学技术, 2015, 37(9):1-6.
ZHONG H W, HAN X, LIU Y B. Shaftless propulsion motor technology application[J]. Ship Science and Technology, 2015, 37(9):1-6. (in Chinese)
- [17] AHN J, PARK C, CHOI S, et al. Integrated motor propulsor magnet design with halbach array for torque ripple reduction[C]//Proceedings of IEEE International Magnetism Conference. Beijing, China:IEEE, 2015.
- [18] HONG D K, JOO D S, LEE J Y, et al. Effects of the pole-slot combination on the PMSM of an integrated motor propulsor for an unmanned underwater vehicle considering its electric performance, noise and vibration[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2016, 52(3-4): 1689-1695.
- [19] 宋保维, 李玉凯, 程博. 集成电机推进器用无刷直流电机齿槽转矩削减新方法[J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(5): 151-156.
SONG B W, LI Y K, CHENG B. A new method for reducing cogging torque of brushless DC motor in integrated motor propulsor[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(5): 151-156. (in Chinese)