

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2014.01.008

对转螺旋桨用永磁盘式对转电机磁场仿真分析

饶志蒙¹, 黄守道¹, 成双银¹, 张恒¹, 朱广辉²

(1. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南长沙 410082;

2. 湘潭牵引电气设备研究所有限公司, 湖南湘潭 411101)

摘要: 为了解决传统对转螺旋桨电力推进电机的成本高、定转子散热和输出转矩不平衡的问题, 设计了一种新型结构的单定子、双转子永磁盘式对转电机。介绍了该电机的基本结构、运行原理和电机磁路特点, 对电机内部对转磁场的耦合问题进行了分析, 并引入等效磁路模型, 同时给出了直角坐标系下, 转子磁极表面的磁通密度公式, 采用有限元法分析电机气隙磁场和平均半径处的气隙磁密。制造了一台盘式对转样机, 并搭建试验平台测试了电机的三相感应电动势。测试结果表明: 由于电机定子绕组端部长度的不对称, 出现了三相感应电动势的不平衡现象。

关键词: 对转螺旋桨; 轴向磁场; 永磁电机; 有限元分析

中图分类号: TM351

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2014)01-0038-06

Simulation Analysis on the Magnetic Field of Permanent Magnet Disc Motor for Contra-Rotating Propellers

Rao Zhimeng¹, Huang Shoudao¹, Cheng Shuangyin¹, Zhang Heng¹, Zhu Guanghui²

(1. School of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Xiangtan Electric Traction Equipment Research Institute Co., Ltd., Xiangtan Hunan 411101, China)

Abstract: In order to overcome the disadvantages of electric propulsion motor of contra-rotating propellers, designed a new structural permanent disc contra-rotating motor of single stator and double rotor. Described the motor's basic structure, operating principle and magnetic circuit characteristics, analyzed the coupling problem of contra-rotating magnetic field in the motor, and introduced the equivalent magnetic circuit model. In Cartesian coordinates, provided the magnetic flux density formula of rotor magnetic pole surface and analyzed the air gap magnetic field and the air gap flux density of the average radius by means of the finite element method. Made a disc contra-rotating motor prototype, and built an experimental platform to test the three-phase induction electromotive force of the motor. The test results show that due to the asymmetric length end of stator winding, the unbalanced three-phase induction electromotive force is found.

Keywords: contra-rotating propeller; axial-field; permanent magnet motor; finite element method

0 引言

目前, 将电力推进技术应用于现代海洋装备中

已成为了研究热点^[1]。电力推进具有体积小、重量轻、布置灵活、安全性好、自动化程度高等特点^[2]。电力推进对转螺旋桨是将2个螺旋桨一前一后布置

收稿日期: 2013-11-12

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划重点基金资助项目(2012BAH11F03), 湖南省研究生科技创新基金资助项目(CX2012B128)

作者简介: 饶志蒙(1989-), 男, 江西东乡人, 湖南大学硕士生, 主要研究方向为特种电机,

E-mail: 694506519@qq.com

在同一轴线上, 2个螺旋桨的旋转方向相反, 这样使得前螺旋桨产生的未被有效利用的涡动能被后一螺旋桨利用, 将其转化为有效的推进动力^[3]。经研究表明, 对转螺旋桨的节能效果可达10%~20%。因此, 它被广泛应用于各种水上、水下装备中。

传统的对转螺旋桨的电机驱动方式有2种: 1) 由2台独立的常规交流或直流电机拖动2个螺旋桨旋转, 这种驱动方式的原理比较简单, 但传动系统成本较高且笨重; 2) 采用一台单定子、双转子径向永磁对转电机驱动^[4], 该电机具有结构简单、紧凑、成本低等优点, 但存在内外转子结构不对称, 电磁设计困难, 双转子转矩输出不平衡, 内外转子和定子散热困难的缺点, 因此, 它不适合水下航行器等封闭环境内使用。

为了解决传统对转螺旋桨电机成本高、定转子散热困难和输出转矩不平衡的问题, 本文提出了一种单定子、双转子盘式对转结构的电机。由于移除了传统电机的电刷、换向器和齿轮等负载装置, 该电机具有可靠性高、维护方便且成本低等优点; 又由于电机采用盘式结构, 左右盘式转子磁路对称, 输出转矩平衡, 故易得到好的散热效果和超强可控性。

1 电机工作原理与定子对转磁场仿真分析

1.1 电机工作原理

盘式电机的最小盘数为2, 但为了增大电机的总有效气隙表面面积, 通常使用3个及以上的盘。本电机采用3个盘式结构。绕组环绕铁心, 2个扇形的永磁转子分别位于定子的左右侧, 通过单个定子结构上复合成一个电机, 相互独立的2个永磁转子通过轴承固定于机座, 且分别与2个内外嵌套机械轴相连, 而内外嵌套机械轴的另一端则分别连接2个对转螺旋桨, 如图1所示。

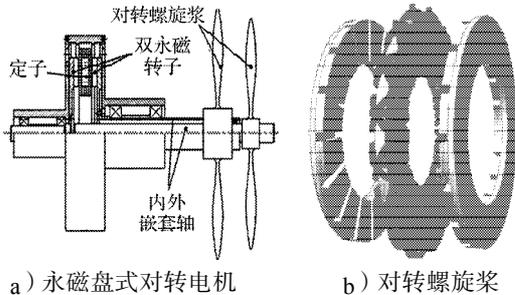


图1 永磁盘式对转电机与对转螺旋桨结构图

Fig. 1 Structural diagram of permanent magnet disc motor and contra-rotating propellers

图2为电机定子无槽交叉环绕绕组原理图。

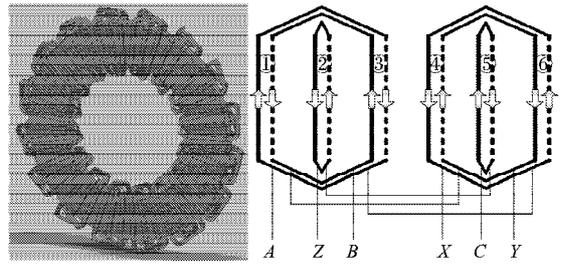


图2 盘式对转电机定子无槽交叉环绕绕组原理图

Fig. 2 Principle diagram of no slot cross winding of disc motor stator

图2中, 实线表示定子一侧的绕组, 虚线表示定子另一侧的绕组。每个线圈都有2个工作面, 每个工作面都正对着转子永磁体, 其中线圈①、④组成A相绕组, ③、⑥组成B相绕组, ②、⑤组成C相绕组, A、B、C三相绕组的中心轴线互差120°电角度, 因此, 三相绕组基波磁动势互差120°电角度。将A相与C相绕组端部交叉放置, 即改变定子两侧绕组相序。如果三相绕组中通入对称三相电流, 那么就可以在定子两侧的气隙平面中得到2个同时逆向旋转的磁场。具体数学推导如下^[5]。

取A相绕组的轴线作为空间电角度 θ 的坐标原点, 并选择A相电流达到最大值的瞬间作为时间的零点, 则三相绕组流过的电流分别为:

$$\begin{cases} i_A = \sqrt{2}I \cos \omega t, \\ i_B = \sqrt{2}I \cos \left(\omega t - \frac{2}{3} \pi \right), \\ i_C = \sqrt{2}I \cos \left(\omega t - \frac{4}{3} \pi \right). \end{cases} \quad (1)$$

式中: I 为相电流;

ω 为电角频率。

A、B、C各相绕组磁动势基波为:

$$\begin{cases} f_{A1} = F_{\varphi 1} \cos \theta \cos \omega t, \\ f_{B1} = F_{\varphi 1} \cos \left(\theta - \frac{2}{3} \pi \right) \cos \left(\omega t - \frac{2}{3} \pi \right), \\ f_{C1} = F_{\varphi 1} \cos \left(\theta - \frac{4}{3} \pi \right) \cos \left(\omega t - \frac{4}{3} \pi \right), \end{cases} \quad (2)$$

式中, $F_{\varphi 1}$ 为每相磁动势基波幅值。

利用三角函数积化和差将式(2)改为:

$$\begin{cases} f_{A1} = \frac{1}{2} F_{\varphi 1} \cos(\omega t - \theta) + \frac{1}{2} F_{\varphi 1} \cos(\omega t + \theta), \\ f_{B1} = \frac{1}{2} F_{\varphi 1} \cos(\omega t - \theta) + \frac{1}{2} F_{\varphi 1} \cos \left(\omega t + \theta - \frac{4}{3} \pi \right), \\ f_{C1} = \frac{1}{2} F_{\varphi 1} \cos(\omega t - \theta) + \frac{1}{2} F_{\varphi 1} \cos \left(\omega t + \theta - \frac{2}{3} \pi \right). \end{cases} \quad (3)$$

为得到三相合成磁动势, 将 f_{A1} 、 f_{B1} 、 f_{C1} 相加。由于

f_{A1}, f_{B1}, f_{C1} 的正弦波在空间相位上互差 120° ，因此，其和值为零。故三相基波磁动势为

$$f_1(t, \theta) = f_{A1} + f_{B1} + f_{C1} = F_1 \cos(\omega t - \theta),$$

式中， F_1 为三相基波合成磁动势的幅值，其数值为 $3/2 F_{\phi 1}$ 。

1.2 定子对转磁场仿真分析

为了更直观地说明定子对转磁场，本课题组进行了三维有限元仿真。由于只检验定子绕组在两边气隙中形成的磁场，不考虑两边转子永磁体，永磁体的磁导率与空气接近，因此，可直接去掉两边转子磁极。图3是定子绕组通入三相对称电流后得到的磁场分布图。选取4个时间点0.035 4, 0.035 8, 0.036 2, 0.036 6 s，时间间隔为0.000 4 s。由图可以看出，一边的气隙磁场绕z轴正方向作逆时针运动，另一边的气隙磁场绕z轴正方向作顺时针运动，两边的磁场同时向相反的方向运动且速度大小相等。

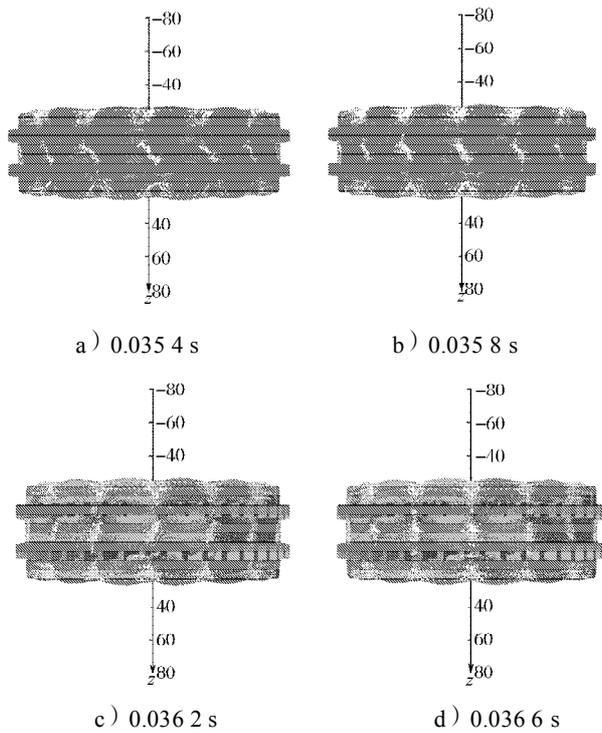


图3 定子绕组对转磁场图

Fig. 3 The stator winding contra-rotating magnetic field

2 永磁盘式对转电机磁场分析

2.1 磁路特点

本文的盘式对转电机为单定子、双转子结构，如图1所示。定子夹在两盘式转子的中间，两转子铁心的内表面安装了轴向磁化扇形永磁体。

传统的盘式单定子、双转子同步电机，双转子固定朝一个方向旋转，转子磁极要么是N-S相对，要么是N-N相对，定子磁路固定。而盘式对转电机

的N-N与N-S周期交替分布，定子磁路和气隙磁密大小周期性变化，这给电机的设计和研究带来了困难^[6-7]。当磁极N-N或S-S相对时，电机双转子产生的磁通是并联关系，主磁通切向流过定子铁心，定子轭部磁密最大，见图4a；当磁极N-S相对时，电机双转子产生的磁通是串联关系，主磁通径向流过定子铁心，定子轭部磁密最小，见图4b；一般情况下，磁通路径曲折变化，见图4c。

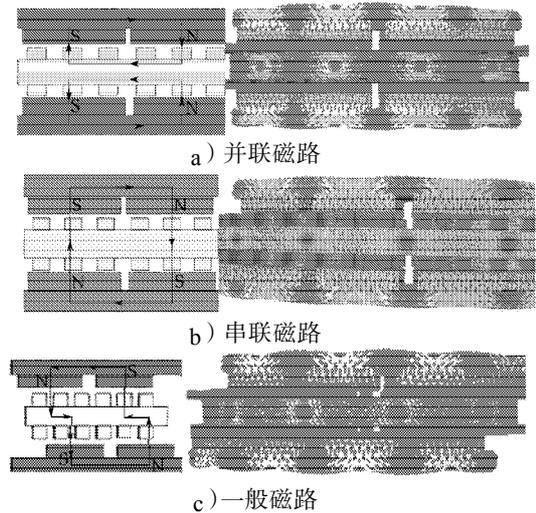


图4 盘式对转电机双转子磁路变化图

Fig. 4 Magnetic change of double rotors of disc contra-rotating motor

2.2 磁路等效模型

盘式对转电机结构对称，在考虑漏磁的情况下，可以得到单段结构的等效磁路，如图5所示。采用等效磁路模型，可将盘式对转电机的并联磁路和串联磁路共同问题简化为单一的并联磁路问题，为该类电机的分析与设计提供简单模型。图中， R_g 为气隙磁阻， R_m 为永磁体内磁阻， R_r 为转子轭部磁阻， F_{m1}, F_{m2} 为磁势， R_s 为定子铁心轴向磁阻， R_{pp} 为定子铁心径向磁阻， R_{mm} 为永磁体间漏磁阻， R_{mr} 为永磁体对转子轭部漏磁阻^[8]。

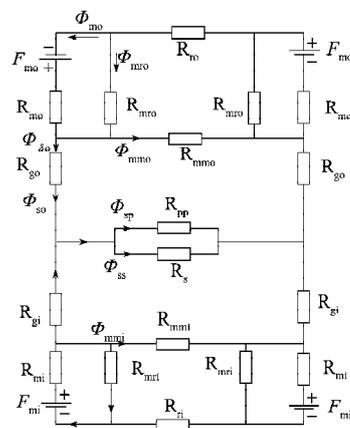


图5 磁路等效模型

Fig. 5 Equivalent magnetic circuit model

2.3 电机气隙磁场

图6是直角坐标系下盘式对转电机的示意图。图中, α_1 为有效极弧系数, d 为定子铁心长度, t 为磁极相对距离。

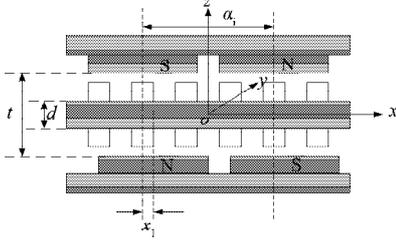


图6 直角坐标系下盘式对转电机
Fig. 6 The disc contra-rotating motor in cartesian coordinates

假设曲率半径大于极距且两边的磁极偏移为 x_0 , 则转子磁极表面的磁通密度可用如下方程表示。

当 $z=0.5d$ 时,

$$B_{mz1}(x,t) = B_0 \sum_{v=1}^{\infty} b_v \cos\left(\omega_v t \mp \beta_v - \frac{\pi}{2}\right), \quad (4)$$

当 $z=-0.5d$ 时,

$$B_{mz2}(x,t) = B_0 \sum_{v=1}^{\infty} b_v \cos\left[\omega_v t \mp \beta_v (x-x_0) - \frac{\pi}{2}\right], \quad (5)$$

在式(4)~(5)中: B_0 为永磁体剩磁; 系数 b_v 参考文献[9],

$$b_v = \frac{4}{\tau} \left[\frac{c_p}{c_p^2 + \beta_v^2} \sinh \alpha - 6 \left(\frac{1}{\beta_v} \right)^4 \frac{1}{b_r^3} \cosh \alpha + 3 \left(\frac{1}{\beta_v} \right)^2 \times \right. \\ \left. \frac{2}{\tau - b_p} \cosh \alpha \right] \sin\left(v \frac{\pi}{2}\right) \sin\left(v \frac{\pi b_r}{\tau}\right) + \frac{4}{\tau} \times \\ \left[\frac{\beta_v}{c_p^2 + \beta_v^2} + 6 \left(\frac{1}{\beta_v} \right)^3 \frac{1}{b_r^2} - \frac{1}{\beta_v} \right] \cosh \alpha \sin\left(v \frac{\pi}{2}\right) \cos(\beta_v b_r),$$

式中, $b_r = \frac{\tau - b_p}{2}$, $c_p = 2 \frac{\alpha}{b_p}$, $\omega_v = \beta_v \pi D n$, $\beta_v = v \frac{\pi}{\tau}$, 其中, b_p 为极靴宽度, τ 为平均磁极, α 为气隙磁密波形系数, n 为电机转速, D 为电机平均半径, 即 $D = (D_o + D_i)/2$, 其中, D_o 为永磁体外径, D_i 为永磁体内径。

平均气隙磁密为

$$B_{avg} = \frac{1}{\pi/p - 0} \int_0^{\pi/p} B_{mg} \sin(p\theta) d\theta = \frac{2}{\pi} B_{mg},$$

式中: p 为极对数;

B_{mg} 为磁密最大值。

在盘式电机设计中, 电机的外内径比 $\lambda = D_o/D_i$ 是一个影响电机性能的重要参数。为了获得较好的电

机性能, 须慎重考虑 λ 的取值。一般情况下, 对于小型电机, λ 取值为 1.4~1.7; 对于中型和大型电机, λ 取值为 1.7~2.0。

2.4 电机磁场的有限元分析

以一台 16 极盘式对转电机为例, 对电机的磁场进行三维有限元分析。图7是电机的磁密云图, 图8是盘式对转电机空载气隙磁密空间分布和磁密等值线图。电机的具体参数见表1。

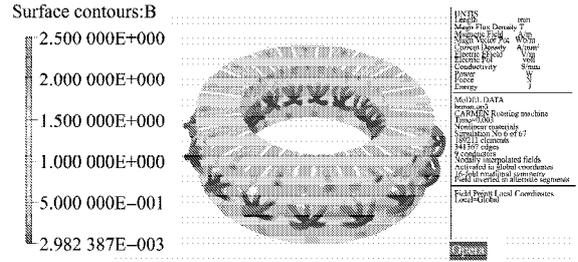
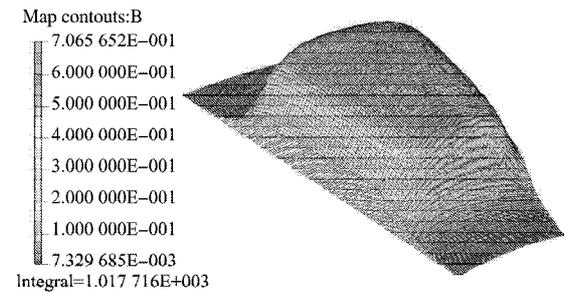
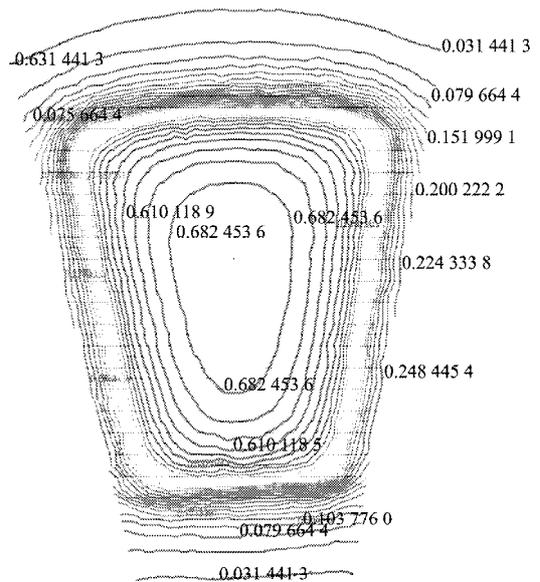


图7 电机磁密云图
Fig. 7 Motor magnetic cloud chart



a) 气隙磁密三维分布



b) 气隙磁密等值线

注: 气隙磁密单位为 T。

图8 电机气隙磁密三维分布和磁密等值线图

Fig. 8 The motor air gap magnetic density 3D distribution and magnetic flux density contour

表1 电机参数表

Table 1 Parameters of motor

参数	数值	参数	数值
额定转速 / ($r \cdot \text{min}^{-1}$)	500	额定频率 / Hz	67
额定转矩 / ($N \cdot m$)	42	额定功率 / W	2 200
定子铁心内径 / mm	75	定子铁心外径 / mm	120
极数	16	轴向长度 / mm	45
线圈匝数	32	气隙长度 / mm	1.2
绕组有效长度 / mm	45	永磁体厚度 / mm	8.5

由图7和8可以看出:某一极下的气隙磁密分布是平顶波型,大小与半径 r 有关,且在平均半径附近,气隙磁密幅值最大,而靠近内外径处,由于受边缘效应的影响,气隙磁密的幅值下降。

图9是平均半径处气隙磁密分布图。合理设计永磁体的形状,可以使磁场尽可能地接近理想的正弦波,减少谐波,减小电机的力矩波动,提高电机的输出力矩。

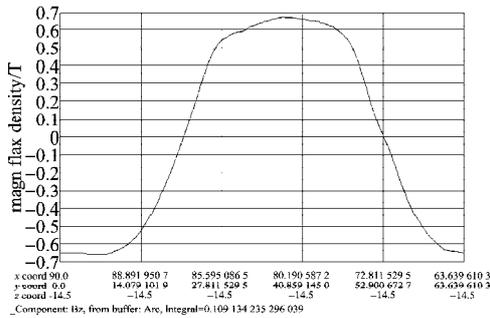


图9 平均半径处气隙磁密分布

Fig. 9 Air gap flux density distribution of the average radius

图10是电机的空载反电动势波形图(单边)。

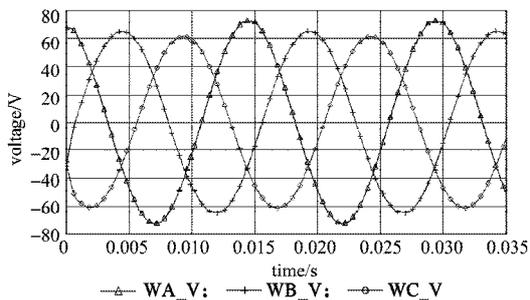


图10 空载反电动势波形

Fig. 10 The no-load EMF waveform

3 试验结果分析

本课题组制造了一台永磁盘式双转子对转电机,具体参数见表1,样机见图11,还加工了一个试验平台,如图12所示。用2台交流电机拖动盘式对转电机,测量其三相空载感应电压波形。



图11 盘式对转电机样机图

Fig. 11 Disc contra-rotating motor prototype

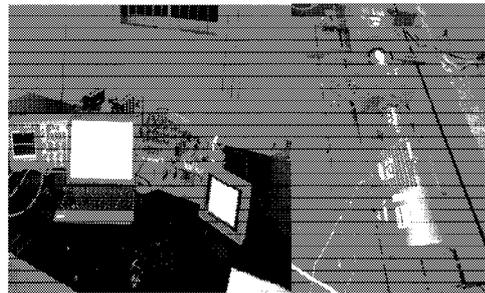


图12 试验平台

Fig. 12 The experimental platform

图13是实测的A相感应电压波形。图中,横轴表示时间,每格为0.005 s,纵横表示A相感应电压,每格为50 V。与图10对比可知,实测电压波形与仿真电压波形一致,验证了此种电机的可行性。

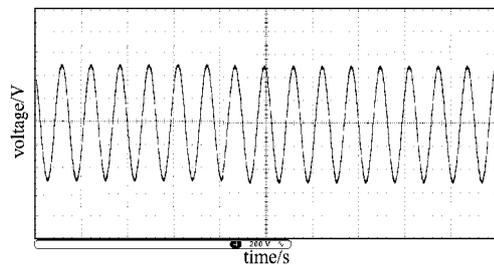


图13 A相空载感应电压波形图

Fig. 13 A phase no-load induced voltage waveform

4 结论

本文介绍了对转螺旋桨用永磁盘式电机的磁路特点,建立了等效磁路模型,对气隙磁通密度公式进行了推导,采用有限元法分析电机气隙磁场和平均半径处的气隙磁密,为下一步合理设计永磁体的形状,使磁场尽可能地接近理想的正弦波提供依据,搭建了试验平台对盘式对转样机进行了测试。得到的测试结论如下:

- 1) 盘式对转电机可以通过一套绕组在定子两边同时产生对转的磁场,实现双转子的对转运动;
- 2) 本文提出的盘式对转电机可以认为是2个独

立的单定子-单转子电机轴向的复合,但该电机不是简单的轴向串联,而是定子共用磁轭,也就是两边的转子磁通会共用定子磁路,定子铁心轴向比转子铁心轴向长,通常是转子铁心轴向的1.2~1.7倍;

3)某一极下的气隙磁密分布是平顶波型,大小与半径 r 有关。合理设计永磁体的形状,使磁场尽可能地接近理想正弦波,减少谐波,减小电机的力矩波动,可提高电机的输出力矩。

参考文献:

- [1] 纪卓尚,林焰,张明霞. 电力推进系统的发展现状及其发展趋势[C]//2006 中国大连国际海事论坛. 大连: [s. n.], 2006: 268-274.
Ji Zhuoshang, Lin Yan, Zhang Mingxia. The Present Situation and Developing Trend of Electric Propulsion Systems[C]//Proceedings of 2006 China Dalian International Maritime Forum. Dalian: [s. n.], 2006: 268-274.
- [2] 陈家金,王和平. 船舶电力推进系统的发展[J]. 世界海运, 2006, 29(4): 9-11.
Chen Jiajin, Wang Heping. Development of Marine Electric Propulsion[J]. World Shipping, 2006, 29(4): 9-11.
- [3] 聂延生,韩学胜,曾鸿,等. 对转螺旋桨的结构原理及特点分析[J]. 船电技术, 2005(2): 50-52.
Nie Yansheng, Han Xuesheng, Zeng Hong, et al. Analysis About the Construction Principle and Characteristics of Contra Rotating Propeller[J]. Marine Electric and Electronic Technology, 2005(2): 50-52.
- [4] 张凤阁,刘光伟,陈进华. 异向旋转双机械口永磁电机磁路建模与场分析[J]. 电机与控制学报, 2009, 13(6): 804-810.
Zhang Fengge, Liu Guangwei, Chen Jinhua. Magnetic Circuit Modeling and Field Analysis for Opposite-Rotation Dual Mechanical Ports PM Machine[J]. Electric Machines and Control, 2009, 13(6): 804-810.
- [5] 辜承林,陈乔夫. 电机学[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2000: 201-202.
Gu Chenglin, Chen Qiaofu. Electromechanics[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2000: 201-202.
- [6] 赵峰,温旭辉,刘钧. 永磁-永磁型双机械端口电机系统建模[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(21): 59-65.
Zhao Feng, Wen Xuhui, Liu Jun. Modeling of PM-PM Dual Mechanical Ports Electric Machine[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(21): 59-65.
- [7] 李练兵,陈鹏,史广奎,等. 混合动力汽车用双转子电机的建模与仿真[J]. 电机与控制学报, 2008, 12(4): 403-408.
Li Lianbing, Chen Peng, Shi Guangkui, et al. Modeling and Simulation of Double-Rotor Motor Applied to the System of Hybrid Electric Vehicle[J]. Electric Machines and Control, 2008, 12(4): 403-408.
- [8] 唐任远. 现代永磁电机理论与设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997: 43-44.
Tang Renyuan. Modern Permanent Magnet Motor Theory and Design[M]. Beijing: China Machine Press, 1997: 43-44.
- [9] Gieras J F, Wang Rongjie, Kamper M J. Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machine[M]. New York: Springer, 2008: 11-12.

(责任编辑: 邓彬)