

新型内置-表贴式异向旋转永磁电机的分析与研究

王晨,曹光华,王亮

(安徽机电职业技术学院电气工程系,安徽 芜湖 241000)

摘要:针对水下航行器运行时易产生侧滚现象,结合内置式永磁电机、表贴式永磁电机及双转子电机的特点,提出一种新型内置-表贴式异向旋转永磁电机,运用磁路法分析此类电机的运行机理及磁路关系。在此基础上,建立新型电机的有限元分析模型,分析其空载反电势及齿槽转矩。研究结果表明,随着内外转子相对位置的改变,内外电机的磁路呈现串联-并联-串并联的变化关系,电机的空载反电势正弦度较好、幅值较高,采用转子斜极结构大大削弱了此类电机的齿槽转矩、降低了振动及噪声,设计出的新型电机满足水下航行器用电机的要求。

关键词:内置-表贴;永磁电机;异向旋转;齿槽转矩

中图分类号:TM351

文献标志码:A

引言

近年来,随着经济全球化,各国对军事上的投入逐渐增多。海军作为衡量军事实力的重要部队,受到广泛的重视。各国为了增强自身的海军军事实力,对水下航行器的研究投入了大量的资金和研究人力^[1-2]。对于水下航行器,由螺旋桨驱动的推进装置是其最重要的组成部分,推进装置不仅产生推进力,还会产生使得航行器侧滚的旋转力,使得其前进的姿势难以保持。为了解决水下航行器的侧滚现象,一般采用高效率电机与机械齿轮相结合的方式,但齿轮的引入大大降低了整个系统的运行效率^[1,4]。为了提高水下航行器的运行效率,将双转子电机应用至水下航行器成为研究热点^[2,5]。

国内外对双转子电机的研究文献较多,文献[5]提出一种盘式双转子电机,分析了电机的运行特性,并将其应用在噪声要求较高的推进装置中;文献[6]提出一种新型定频双转子风力发电机,基于等效热网络法分析其发热特性,为其在风力发电领域的应用奠定基础,并取得了一定的研究成果;文献[7]提出一种定子永磁型

双转子永磁电机,利用有限元方法分析其空载反电势和电感特性,并将其应用在混合动力汽车中。上述相关文献所提出的双转子电机,虽为双机械端口输出,但其旋转方向依然只固定于同向旋转,不适用于水下航行器推进器中。为了解决水下航行器易侧滚、推进效率低下的问题,在结合国内外相关文献的基础上,提出一种水下航行器用内置-表贴式异向旋转永磁电机,如图1所示。该电机为单电输入,双机械端口输出,采用环形绕组的特殊形式,实现了同速、异向的旋转。内转子永磁体采用内置-表贴的特殊结构,提高了电机的输出转矩、减小了电机的脉动转矩。同速异向旋转及双机械端口的输出,大大简化了水下航行器推进系统的结构,提高了运行效率,有效地消除了侧滚转矩。

1 电机的运行机理

新型内置-表贴异向旋转永磁电机的结构如图1所示。电机由外而内由外转子、外转子永磁体、定子、内转子表贴式永磁体、内转子及内转子内置式永磁体构成。定子双边开槽,采用单电输入的端口。因此,该电

收稿日期:2016-09-18

基金项目:安徽省自然科学基金重点项目(KJ2016A128);安徽机电职业技术学院自然科学基金重点项目(2016zdzr019)

作者简介:王晨(1987-),男,安徽桐城人,讲师,硕士,主要从事新型电机设计与分析方面的研究,(E-mail) wangchen1071@163.com

机可近似看作内转子永磁电机和外转子永磁电机组合而成,其内转子电机采用混合永磁体的特殊结构。双边开槽的定子绕组内放置环形绕组,为实现电机的同速异向旋转,内外层定子绕组的任意两相相序反接(如 B、C 相),如图 2 所示。

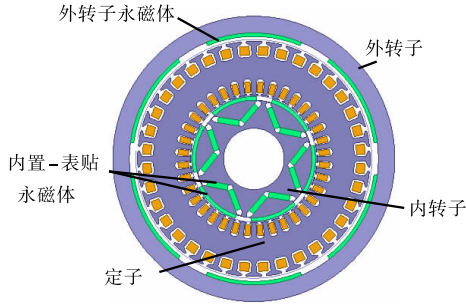


图 1 电机结构示意图

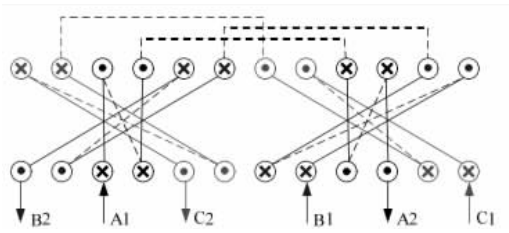


图 2 环形绕组连接图

当定子绕组通入三相交流电时,内外层绕组产生两套异向旋转的磁场,磁场与内外转子永磁体产生的磁场相互作用产生异向旋转的电磁转矩,分别带动内外转子转动^[7-8]。由图 1 可知,新型电机共用电机的定子轭部,磁力线在定子铁芯耦合,磁通变换路径随着内外转子永磁体相对位置的变化而成周期性的串联、串并联以及并联交替变化。

2 新型电机的电磁关系

由前面的分析可知,新型电机可等效成一台外转子表贴式永磁电机和一台内转子内置-表贴式永磁电机的串联,当电机的磁路不饱和时,利用同步电机的叠加原理,电机的磁动势由电励磁磁动势和永磁体产生的磁动势共同作用产生。

当电机的磁路饱和时,由于磁阻的非线性特性,磁通不再满足线性叠加的前提条件。应用安培环路定律,磁动势却可满足叠加原理,可先得出合成磁动势,由合成磁动势求出气隙磁动势^[9-11]。

根据新型电机的电磁关系,内外转子绕组相序反接,内外层永磁体产生的空载磁通在内外层绕组上感应的空载反电势相串联。当电机磁路不饱和时,对于主磁

路,根据法拉第电磁感应定律, $E_a \propto \Phi_a \propto F_a \propto I$;而对于漏磁路,磁路的磁导率不变,磁路呈现非线性, $E_\sigma \propto \Phi_\sigma \propto I$ 。可得到新型电机的电动势平衡方程式为:

$$\dot{U} = \dot{I}R_{a0} + \dot{E}_{\sigma0} + \dot{E}_{a0} + \dot{E}_o + \dot{I}R_{ai} + \dot{E}_{\sigma i} + \dot{E}_{ai} + \dot{E}_i \quad (1)$$

式中, R_{ai} 、 R_{a0} 为内外层绕组的内阻; $E_{\sigma i}$ 、 $E_{\sigma0}$ 为内外转子电机产生的漏感应电势; E_{ai} 、 E_{a0} 为内外转子电机产生的电枢反应电势; E_i 、 E_o 为内外转子电机产生的空载反电势。

根据场路耦合的原理,可得到:

$$\dot{E}_{\sigma0} = j \dot{I}X_{\sigma0} \quad (2)$$

$$\dot{E}_{a0} = j \dot{I}X_{a0} \quad (3)$$

$$\dot{E}_{\sigma i} = j \dot{I}X_{\sigma i} \quad (4)$$

$$\dot{E}_{ai} = j \dot{I}X_{ai} \quad (5)$$

式中, I 为电机的定子电流, $X_{\sigma0}$ 、 X_{a0} 、 $X_{\sigma i}$ 、 X_{ai} 分别为外转子绕组漏电抗,外转子绕组同步电抗,内转子绕组漏电抗、内转子绕组同步电抗。

结合式(1)~式(5),可得到新型电机的下列电动势平衡方程式:

$$\dot{U} = \dot{U}_o + \dot{U}_i = R \dot{I} + jX \dot{I} + E \quad (6)$$

其中:

$$R = R_{ai} + R_{a0}, X = X_{ai} + X_{a0} + X_{\sigma i} + X_{\sigma0}, E = E_i + E_o$$

由电压平衡方程式可知,新型电机可等效为内转子电机和外转子电机的串联,它们的负载电流相同。

3 新型电机的磁路分析

3.1 定子铁芯磁场分布

由交流电机的基础知识可知,对于普通的三相永磁电机,定子铁芯产生的磁场为旋转磁场。本文提出的新型异向旋转永磁电机,其定转子的特殊结构导致定子铁芯的磁场分布不符合一般三相永磁电机的分布规律。为了简便分析新型电机定子磁场,做出如下假设^[12-15]:

- (1) 两套绕组通入的为三相正弦交流电流。
- (2) 不计铁芯饱和的影响。
- (3) 绕组的电流集中在槽中心处。
- (4) 取电机的磁极对数 $p = 1$,每极每相槽数 $q = 1$ 。

当两套绕组通入三相交流电时,A、B、C 三相绕组的空间相差 120 电角度,三相绕组产生幅值相等、空间上相差 120 电角度的基波磁动势,取其中一相(A 相)的轴线为参考线进行分析。三相电流为:

$$\begin{cases} i_A = I_m \sin \omega t \\ i_B = I_m \sin(\omega t - 120^\circ) \\ i_C = I_m \sin(\omega t + 120^\circ) \end{cases} \quad (7)$$

由前述的分析,假设基波磁动势的幅值为 F_m ,则外转子电机及内转子电机定子绕组 A_o 、 B_o 、 C_o 、 A_i 、 B_i 、 C_i 产生的基波磁动势分别为:

$$\begin{cases} f_{\Phi A_o} = F_m \cos \alpha \cos \omega_1 t \\ f_{\Phi B_o} = F_m \cos(\alpha - 120^\circ) \cos(\omega_1 t - 120^\circ) \\ f_{\Phi C_o} = F_m \cos(\alpha + 120^\circ) \cos(\omega_1 t + 120^\circ) \\ f_{\Phi A_i} = F_m \cos(\alpha + 180^\circ) \cos \omega_1 t \\ f_{\Phi B_i} = F_m \cos(\alpha + 60^\circ) \cos(\omega_1 t - 120^\circ) \\ f_{\Phi C_i} = F_m \cos(\alpha + 300^\circ) \cos(\omega_1 t - 240^\circ) \end{cases} \quad (8)$$

式中, F_m 为基波磁动势的幅值; $f_{\Phi A_o}$ 、 $f_{\Phi B_o}$ 、 $f_{\Phi C_o}$ 、 $f_{\Phi A_i}$ 、 $f_{\Phi B_i}$ 、 $f_{\Phi C_i}$ 分别为外转子电机三相绕组和内转子电机三相绕组产生的基波磁动势。

定子铁芯产生的合成磁动势为内定子、外定子绕组产生的磁动势之和。由积化和差及和差化积的公式可得。

$$\begin{aligned} f &= f_{\Phi A_o} + f_{\Phi B_o} + f_{\Phi C_o} + f_{\Phi A_i} + f_{\Phi B_i} + f_{\Phi C_i} = \\ &= \frac{3}{2} F_m \cos(\alpha - \omega_1 t) - \frac{3}{2} F_m \cos(\alpha + \omega_1 t) = \\ &= 3 F_m \sin \alpha \sin \omega_1 t \end{aligned} \quad (9)$$

由式(9)可知,定子合成磁动势为空间位置不变,大小随时间变化的磁动势,即脉振磁动势^[12]。

3.2 转子的磁路分析

由于定子铁心磁场为脉振磁场,而内外转子是异向旋转,当内外转子发生转动时,内外转子永磁体的相对位置将发生改变。相对位置的改变,使得新型电机的磁路不是简单的串并联关系,图3为内外转子相对发生改变时电机的磁力线分布图。

由图3可知,当内外转子处于图3(a)所示的位置时,电机的磁路处于并联的关系;当电机的内外转子处于图3(b)所示的位置时,内外转子磁路处于串联的关系;当内外转子处于图3(c)所示的位置时,内外转子的磁路既有串联磁路和并联磁路。

4 新型电机的电磁特性分析

由电机的磁路分析可知,普通的磁路分析法必然会造成分析结果的误差较大,本文采用有限元分析的方法分析此新型电机。

空载反电势为永磁电机的定子绕组不通电时,永磁体产生的空载磁通链经过定子绕组产生的感应电势,其

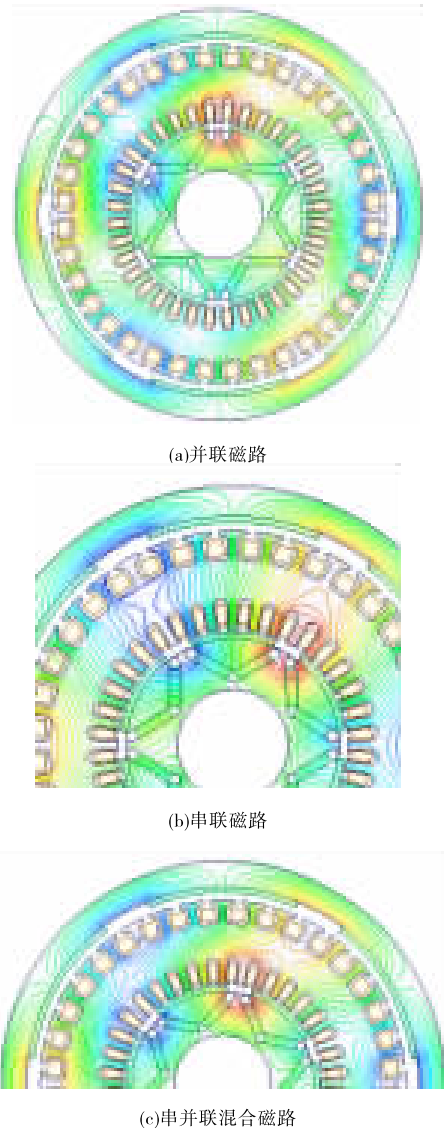


图3 电机磁路图

值大小反映电机的效率及输出性能。

建立电机的有限元分析模型,分析该新型电机的空载反电势。由于新型电机采用环形绕组,每一相绕组的反电势为外转子电机与内转子电机的空载反电势的叠加之和,且电机的初始位置角度对空载反电势的大小有影响,需选择合适的转子位置角度,得到内外转子的空载反电势的波形图,如图4所示。

由图4可知,内外转子电机空载反电势幅值大约为197 V左右,反电势正弦度较高,符合水下航行器的设计要求,电机设计合理。

新型电机的齿槽转矩为电机不通电时,气隙中磁场能量的变化对转子位置角度的负导数。设置零激励电流源,细分气隙的剖分质量,设置电机低速旋转,得到内外转子电机的齿槽转矩,如图5所示。

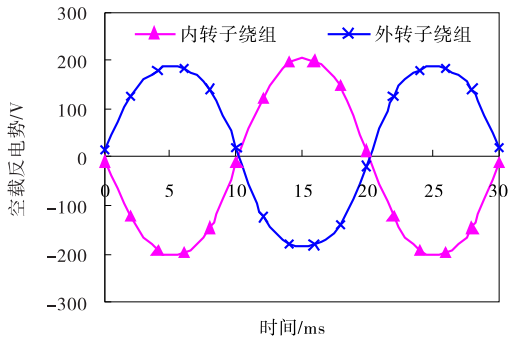


图 4 新型电机的空载反电势

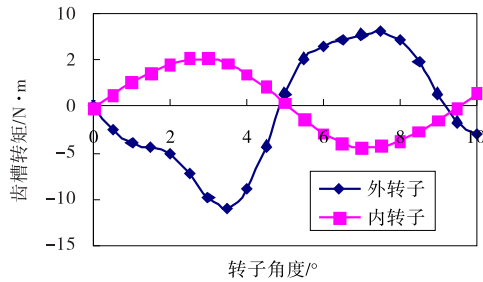


图 5 新型电机的齿槽转矩

由图 5 可知,内转子电机的齿槽转矩为 $5 \text{ N}\cdot\text{m}$,外转子电机的齿槽转矩大约为 $8 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。电机的齿槽转矩较大,易产生振动和噪声,采用永磁体斜极的方法削弱该新型电机的齿槽转矩,得到斜极前后电机的齿槽转矩,如图 6 所示。

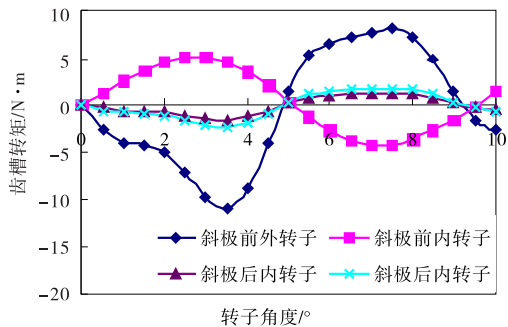


图 6 斜极前后齿槽转矩对比

由图 6 可知,采用永磁体斜极后,齿槽转矩幅值由 $5 \text{ N}\cdot\text{m}$ 、 $8.5 \text{ N}\cdot\text{m}$ 削弱至 $2.2 \text{ N}\cdot\text{m}$ 、 $2.5 \text{ N}\cdot\text{m}$,齿槽转矩得到明显削弱,电机的振动和噪声情况得到明显的改善和调节。

5 结束语

本文提出一种水下航行器用新型内置-表贴式异向旋转电机,分析新型电机的运行机理及电磁关系。结果表明,内外转子的相对位置发生改变时,电机的磁路发生改变;新型电机的空载反电势正弦度较高,符合水

下航行器的设计要求;通过转子斜极可大大削弱新型电机的齿槽转矩。

参考文献:

- [1] 陈进华.异向旋转双转子永磁电机研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2012.
- [2] 张林森,徐海珠,胡平.新型双转子永磁电机转速同步技术的研究进展[J].微特电机,2015,43(4):77-79.
- [3] 丁文俊,宋保维,毛昭勇,等.浅水域探测型无人水下航行器海洋动能发电装置特性研究[J].西安交通大学学报,2014,48(4):73-78.
- [4] STONER A W, RYER C H, PARKER S J, et al. Evaluating the role of fish behavior in surveys conducted with underwater vehicles[J]. Canadian Journal of Fisheries & Aquatic Sciences, 2008, 65(3):1230-1243.
- [5] HUANG S, AYDIN M, LIPO T A. Comparison of (non-slotted and slotted) surface mounted PM motors and axial flux motors for submarine ship drives[C]//Proceeding of the 3rd Naval Symposium on Electrical Machines, Philadelphia, December 4-7, 2000: 1417-1426.
- [6] 张建忠,姜永将.基于等效热网络法的定频双转子永磁风力发电机的热分析[J].电工技术学报,2015,30(2):87-97.
- [7] HU J, LUO Y L, LIU M J. Analysis of the iron loss of line start permanent magnet synchronous motor using time-stepping finite element method[C]//Proceedings of the 11th International Conference on Electrical Machines and Systems Volume 6, Wuhan, October 17-20, 2008:3237-3240.
- [8] 李延升,窦满峰,樊鑫.表贴式永磁电机气隙磁场及齿槽转矩解析计算[J].微特电机,2012,40(12):9-15.
- [9] 倪有源,余长城,黄亚.通用型永磁同步屏蔽电机电磁设计[J].微特电机,2016,44(4):1-4.
- [10] 张永昌,高素雨.考虑延时补偿的永磁同步电机电流预测控制[J].电气工程学报,2016,11(3):13-20.
- [11] HSIEH M F, YEH Y H. Rotor eccentricity effect on cogging torque of PM generators for small wind turbines[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2013, 49(5):1897-1900.
- [12] 曲子扬,陈兵,高淑慧,等.考虑输入饱和的永磁同步

- 电机随机非线性控制[J].青岛学报大学:工程技术版,2016,31(1):40-46.
- [13] 郭培,史涪激,王莉.两极异步起动永磁同步电机齿槽转矩的研究[J].微电机,2013,46(5):21-26.
- [14] 王秀和,丁婷婷,杨玉波,等.自起动永磁同步电动机齿槽转矩的研究[J].中国电机工程学报,2005,25(18):167-170.
- [15] 杨玉波,王秀和,丁婷婷,等.极弧系数组合优化的永磁电机齿槽转矩削弱方法[J].中国电机工程学报,2007,27(6):7-11.

Analysis and Research of the New Built-surface and Counter-rotating Permanent Magnet Motor

WANG Chen, CAO Guanghua, WANG Liang

(Department of Electrical Engineering, Anhui Technological College of Machinery and Electricity, Wuhu 241000, China)

Abstract: For the side rolling of underwater vehicle in operation, and in combination of the characteristics of built-in permanent magnet motor, surface-mounted permanent magnet motor and dual-rotor motor, a novel built-in surface-mounted counter-rotating permanent magnet motor is proposed. The operating mechanism and the relationship with magnetic circuit by the method of magnetic circuit are analyzed. On the basis of this, the finite element analysis model of the new motor is built, besides, its no-load back-EMF (electromotive force) and cogging torque are analyzed. The research results show that, with the change of the relative position of internal and external rotors, the relationships of series, parallel, serial-parallel in the magnetic circuits of internal and external motors are changed; the no-load back EMF of the motor has a good sinusoidal and a high amplitude; the cogging torque of such motors, the vibration and the noise is reduced greatly by the oblique pole structure of rotor, so the new motor can meet the requirements of underwater vehicles.

Key words: surface-mounted; permanent magnet motor; counterrotating; cogging torque