DOI:10.12177/emca.2024.073 文章编号:1673-6540(2024)08-0050-09 中图分类号:TM 341 文献标志码:A

聚磁式转子轴向磁齿轮复合电机的有限元分析

徐 航,黄平林*
(江苏大学 机械工程学院,江苏 镇江 212013)

Study on an Axial Magnetic Gear Composite Motor with Spoke-Type Rotor by Finite Element Method

XU Hang, HUANG Pinglin*
(College of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: The principles of magnetic field modulation and axial magnetic gear composite motors are firstly systematically described. Based on thus, an axial magnetic gear composite motor with a spoke-type rotor structure is proposed. And the finite element analysis method is adopted to carry out three-dimensional numerical simulation analysis of the electromagnetic performance of the composite motor, which verifies the reasonableness of the structure of the motor. The influence of each parameter of the spoke-type rotor on the output torque and axial magnetic pulling force of the motor is further analyzed, and it is concluded that the influence of the rotor parameters on the circumferential and axial magnetic pulling force of the two sides of the rotor is similar, which provides a theoretical basis for subsequent experimental research.

Key words: axial flux motor; magnetic gear; magnetic field modulation; finite element analysis; spoke-type rotor structure

摘 要:在系统介绍轴向磁齿轮复合电机基本工作原理的基础上,提出了一种具有聚磁式转子的轴向磁齿轮复合电机。采用有限元分析方法对复合电机的电磁性能进行了三维数值仿真分析,验证了电机结构的合理性,并详细分析了聚磁式转子结构参数对电机输出转矩与轴向磁拉力的影响,得出转子参数对转子两侧圆周和轴向磁拉力的影响相似,为后续的试验研究提供了理论参考。

关键词:轴向磁通电机;磁齿轮;磁场调制;有限元分析;聚磁式转子结构

0 引言

在努力实现“碳中和”的背景下,对清洁能源的开发正在稳步进行中,永磁电机作为将电能转换为机械能的基础设施,其在新能源发电、航天航空、轨道交通、工业伺服、及医疗设备等方面发挥着重要作用,具有重大的社会和经济价值[1]。磁齿轮利用磁场的调制效应,实现主动轮与从动轮之间无接触传动,与传统机械齿轮相比具有降低噪声与振动、过载能力保护、输出端与输入端之间存有物理隔离以及可靠性高不需要经常维护等优点[2-3]。磁齿轮复合电机(Magnetic Gear Composite Motor, MGCM)是将磁齿轮与永磁电机集成的复合电机,相对传统永磁电机加机械齿轮箱的组合,MGCM 能够有效降低电机整体的体积和成本,在提升电机效率的同时满足低速大转矩直驱的需求[4-5],在航空航天[6-7]、新能源发电[8-9]及电动汽车[10]等领域拥有巨大的应用潜力。

磁齿轮复合电机有径向和轴向串联等多种拓扑结构[11]。张东等人[12]将径向电机的外转子与磁齿轮的高速转子组合,由磁齿轮的低速转子作为输出端,转矩密度达到了 87 N·m/L,但其结构复杂,对装配要求较高;英国 Sheffield 大学[13]提出了一种伪直驱的径向磁齿轮复合电机,将磁齿轮的两个转子分别与电机的定子与转子复合,进一步简化了电机结构;湖南大学[14]对三种拓扑结构的轴向磁齿轮的特性进行了分析比较,结果表明聚磁式结构的磁齿轮具有最高的输出转矩能力和永磁体利用率;Jonathan 等人[15]提出了一种将轴向聚磁性磁齿轮与径向磁通电机串联的复合结构,该结构的转矩密度能达到 90 N·m/L;丹麦学者提出了一种轴向串联的磁齿轮机器,通过外壳与轴的共用,有效减少了系统的体积与重量[16];德州研究人员将轴向磁通电机放置在磁齿轮的内

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

部，通过径向串联的方式有效利用了盘式转子的内部空间，使得整体结构更加紧凑[17]；NASA[18]提出了一种双面轴向磁齿轮电机结构，该结构将两个轴向磁齿轮与轴向磁通电机轴向串联实现转矩的传递，经分析得出该电机效率能达到 97%，并且转矩密度能达到 20 N·m/kg。在上述 MGCM 结构中，径向串联的方式由于多层嵌套导致系统整体比较复杂；而轴向串联的方式由于未能实现磁路部分的复用，增加了电机的整体体积，不利于转矩密度的提升。

针对上述问题，本文提出了一种聚磁式转子结构轴向磁齿轮复合电机，将轴向磁通电机与轴向磁齿轮相结合，最大限度地实现了结构的复用。本文介绍了其工作原理，并通过有限元方法分析了该电机的磁场与转矩特性，以及转子结构参数对输出转矩与轴向力的影响。

1 轴向磁齿轮复合电机工作原理

2001 年英国 Sheffield 大学的学者首先提出了同轴磁齿轮的结构，能实现同轴、径向上的无接触传动[19]，引起专家学者的广泛关注。不同于同轴径向磁齿轮结构，轴向磁齿轮主要由两个不同极对数的转子以及在转子之间的调磁环轴向组合而成，其中两个转子上分布着极对数不等的永磁体，调磁环由导磁材料构成。轴向磁齿轮复合电机是在轴向磁齿轮的调制环上加入励磁绕组，利用磁场调制原理进行工作，具有永磁电机和磁齿轮的双重工作特性。

单独考虑磁齿轮的情况下，少极一侧的永磁体产生的磁场经过调制后的极对数与旋转速度可由式(1)、式(2)表示[19]：

$$\begin{cases} P_{m,k}=|mp_{\mathrm{h}}+kn_{\mathrm{s}}| \\ m=1,3,5,\cdots,\infty \\ k=0,\pm1,\pm2,\pm3,\cdots,\pm\infty \end{cases} \tag{1}$$

$$\omega_{m,k}=\frac{mp}{mp+kn_{\mathrm{s}}}\omega_{\mathrm{r}}+\frac{kn_{\mathrm{s}}}{mp+kn_{\mathrm{s}}}\omega_{\mathrm{m}} \tag{2}$$

式中：p_{h}、ω_{r}、n_{s}、ω_{m} 分别为少极高速转子极对数、旋转速度、调制单元的数量和调制单元的转速。

另一侧的转子产生的磁场需要与该调制磁场耦合，考虑到传递转矩的最大化，当 $m=1$、$k=-1$ 时，其调制后的异步空间磁场谐波幅值达到最大，能够传递的转矩也达到最大，此时多极低速转子的极对数 $p_{\mathrm{l}}=|p_{\mathrm{h}}-n_{\mathrm{s}}|$[19]。在固定调制单元的情况下，该磁齿轮的传动比可表示为

$$G_{\mathrm{r}}=\frac{\omega_{\mathrm{h}}}{\omega_{m=1,k=-1}}=\frac{p_{\mathrm{h}}-n_{\mathrm{s}}}{p_{\mathrm{h}}}=-\frac{p_{\mathrm{l}}}{p_{\mathrm{h}}}=\frac{T_{\mathrm{l}}}{T_{\mathrm{h}}} \tag{3}$$

式中：T_{l} 与 T_{h} 分别为多极低速转子与少极高速转子的转矩。

磁齿轮在传递转矩时，其输出转矩 T 的大小与两个转子之间的角度有关，可以表示为[20]

$$T=T_{\mathrm{m}}\sin(P_{\mathrm{h}}\theta_{\mathrm{h0}}-P_{\mathrm{l}}\theta_{\mathrm{l0}}) \tag{4}$$

式中：θ_{h0}、θ_{l0}、T_{m} 分别为两转子的初始位置角度和磁齿轮能传递的最大转矩。

由式(3)、式(4)可知，当传动比一定时，磁齿轮传递的转矩会随着两个转子之间的角度变化而呈正弦变化，这一特性被称为磁齿轮的矩角特性[21]。

在轴向磁齿轮复合电机中，当调制环上加入电枢绕组并通入电流时，经过调制后产生的空间谐波磁场的极对数 P_{s} 可表示为[22]

$$\begin{cases} P_{\mathrm{s}}=|\nu p_{\mathrm{s}}+ln_{\mathrm{s}}| \\ \nu=1,5,7,11\cdots \\ l=0,\pm1,\pm2,\pm3\cdots \end{cases} \tag{5}$$

式中：p_{s} 为电枢绕组极对数。

当 $l\neq0$ 时(存在调制)，经过调制后定子绕组产生的调制空间谐波磁场极对数与转速可表示为

$$\omega_{\mathrm{s}}=\begin{cases} \dfrac{p_{\mathrm{s}}\omega_{\mathrm{s}}+ln_{\mathrm{s}}\omega_{\mathrm{m}}}{\nu p_{\mathrm{s}}+ln_{\mathrm{s}}},\ \nu=1,7,13,19\cdots \\ \dfrac{-p_{\mathrm{s}}\omega_{\mathrm{s}}+ln_{\mathrm{s}}\omega_{\mathrm{m}}}{\nu p_{\mathrm{s}}+ln_{\mathrm{s}}},\ \nu=5,11,17\cdots \end{cases} \tag{6}$$

式中：ω_{s} 为电枢磁场转速。

当电枢绕组产生的空间磁场与转子产生的磁场具有相同的极对数时，即可实现磁场之间的相互耦合和电磁转矩的稳定传递。

2 聚磁式转子复合电机的拓扑结构

本文提出的轴向磁齿轮复合电机三维模型如图 1 所示，由少极转子、多极转子、定子以及定子绕组组成。两个转子均由切向充磁的辐条式永磁体与铁心构成聚磁式结构，相邻的两个永磁体的充磁方向相反，定子由多个定子齿组成，同时起到调磁块的功能。该结构实现了磁齿轮和永磁电机磁路的完全复用，而且定转子均无磁轭，最大限度地减少了体积和重量。其相关参数如表 1 所示。

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

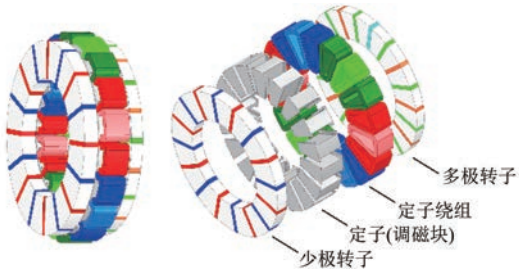


图 1　聚磁式轴向磁齿轮复合电机三维模型

Fig. 1　Three-dimensional model of a polymagnetic axial MGCM

表 1　复合电机主要参数

Tab. 1　Main parameters of composite motor

参数名称	参数值
定、转子铁心材料	硅钢片
少极转子转速/(r•min^{-1})	4 000
多极转子转速/(r•min^{-1})	3 200
少极转子极对数	8
多极转子极对数	10
定子齿数	18
定子内、外径/mm	143、247
气隙长度/mm	1

3　聚磁式转子复合电机的有限元分析

3.1　电机磁场的仿真分析

采用有限元软件对电机磁场进行三维数值仿真计算。在空载条件下，将两个转子的初始位置调整为图 2(a)所示的位置，两个转子以额定转速旋转，电机的磁链与相反电动势的波形及其谐波分布如图 3 所示。

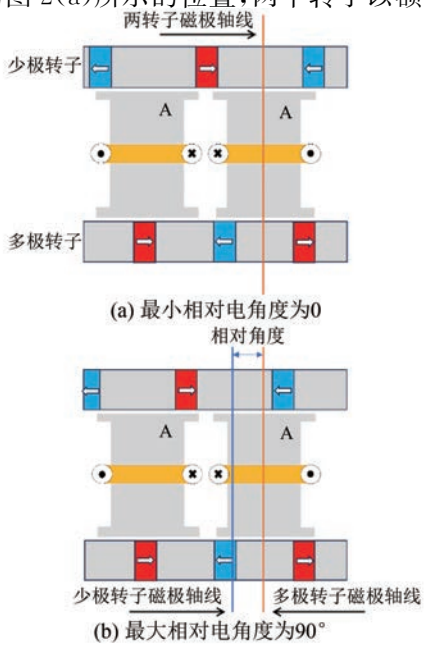


图 2　两转子相对角度图

Fig. 2　Diagram of the relative angle of the two rotors

由图 3 可知，电机的磁链波形呈正弦且对称，其幅值达到 0.148 Wb，相反电动势的幅值为 514 V，且含有少量的三次及五次谐波。

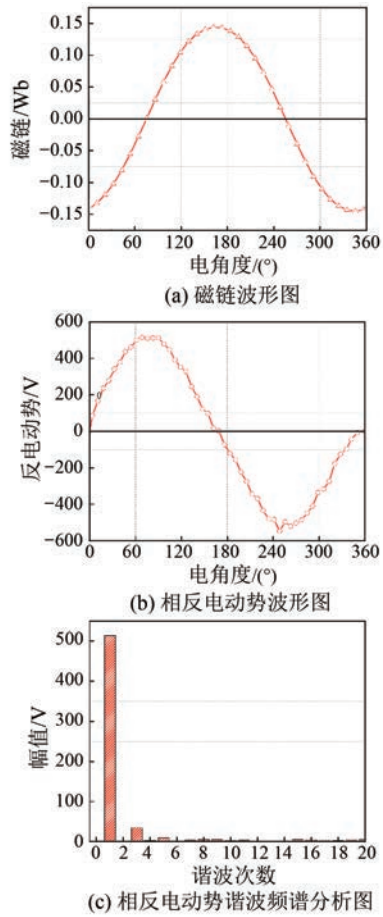


图 3　空载情况下的磁场有限元分析结果

Fig. 3　Results of finite element analysis of the magnetic field at no-load

两个转子共同作用时气隙磁密分布如图 4(e)、(f)所示，其中含有多次谐波，这是磁路固有结构与磁场调制产生的结果[23]。作为对比，图 4(a)、(b)和图 4(c)、(d)分别给出了仅考虑一侧转子作用时的气隙磁密分布。

由图 4 可知，两侧转子共同作用时对应的气隙磁密主要为 8 次谐波和 10 次谐波，幅值分别为 0.93 T 和 1 T，相较两个转子单独作用时分别提升了 9.4% 和 11%。

有限元分析结果表明，该电机定子能够有效调制两个转子产生的磁场，使之建立稳定的联系，提供传递转矩的能力，并且提升了磁场强度，验证

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

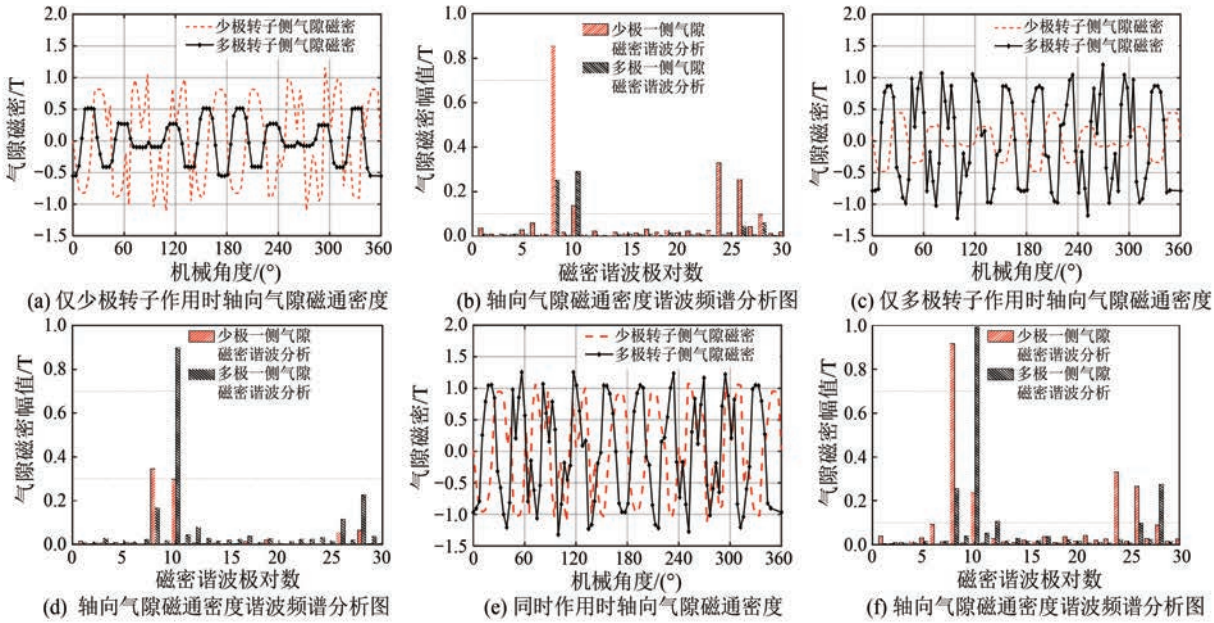


图 4　不同情况下的气隙磁密分析结果

Fig. 4　Results of air gap magnetic density analysis for different cases

了电机结构的合理性。

3.2　转矩特性分析

该 MGCM 的有效输出转矩主要有磁齿轮效应传递的永磁转矩和电枢磁场与永磁磁场相互作用产生的电磁转矩两部分[24]，以下对电机的转矩特性进行分析。

将少极转子保持在 $\theta_h=0°$处，固定多极转子，少极转子以多极转子的位置为参考进行增量旋转。随着少极转子与多极转子相对位置的改变，其转矩也会随之呈正弦变化，结果如图 5 所示。当相对位置电角度为 90°时，转矩达到最大值，此时少极转子的机械角度可由式(4)计算得到 11.25°。相反，将多极转子进行增量旋转，转矩最大时多极转子对应的旋转机械角度为 9°，图中结果与前文理论分析相吻合。

3.2.1　*永磁转矩*

图 6 为两转子初始相对电角度为 90°时的转矩分析结果。在无电枢电流的情况下，两个转子的最大转矩分别约为 52.76 N·m 和65.84 N·m，对应的传动比约为 1.25。

3.2.2　*电磁转矩*

根据永磁同步电机的工作原理，如图 2(b)所示，将多极转子 d 轴与绕组 A 相对齐，往定子绕组中通入额定电流，电枢磁场只与多极转子

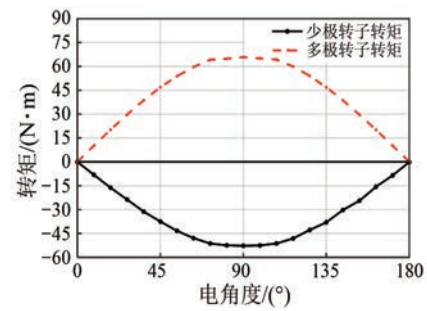


图 5　固定多极转子的矩角特性

Fig. 5　Moment angle characteristics of fixed multipole rotors

的永磁磁场作用，此时多极转子的转矩将得到显著增加，同时少极转子的平均转矩并不会受到电枢作用的影响[24]，分析结果如图 7 所示。多极转子输出转矩达到了 132 N·m，少极转子转矩变化不大。此时输出端转矩包含了电磁转矩与磁齿轮传递的转矩，输出转矩提升了约 100%。

图 8 为不同电流情况下，两个转子的转矩随着电流的变化关系。

由图 8 可知，多极转子转矩与电流的大小接近线性关系，而少极转子转矩基本不受电流大小的影响。此时，初始相对电角度为 90°，多极转子输出转子达到最大。

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

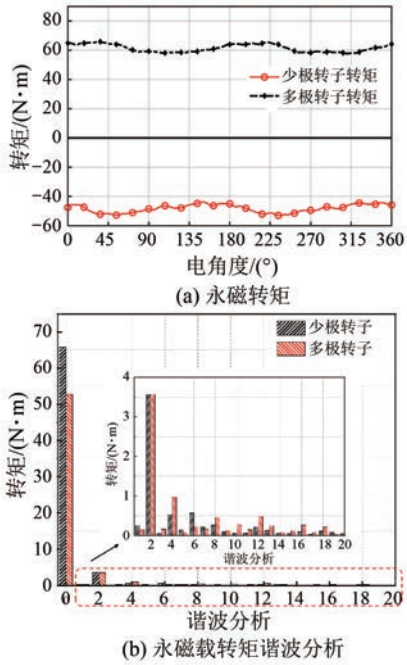


图 6　无负载转矩与谐波分析

Fig. 6　Torque and harmonic analysis at no-load

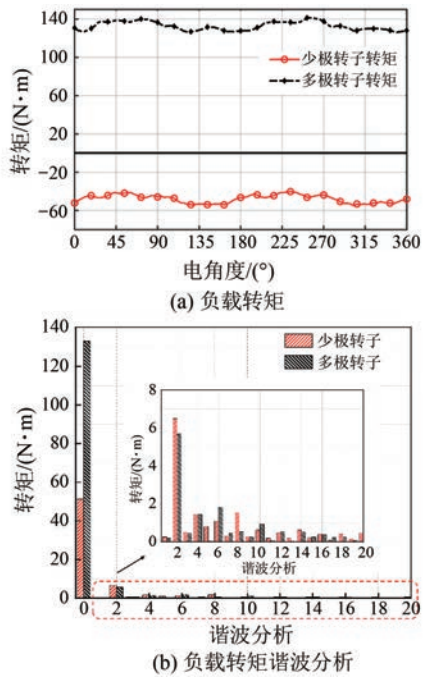


图 7　负载转矩与谐波分析

Fig. 7　Torque and harmonic analysis at on-load

4　永磁转子各参数对输出转矩与轴向磁拉力的影响

不平衡的轴向磁拉力是制约轴向磁齿轮电机发展的一个重要因素之一，本文以多极转子为输出端，少极转子为输入端，以输出转矩和轴向磁拉力为目标，对转子参数进行分析。永磁转子示意图如图 9 所示，各相关参数如表 2 所示。

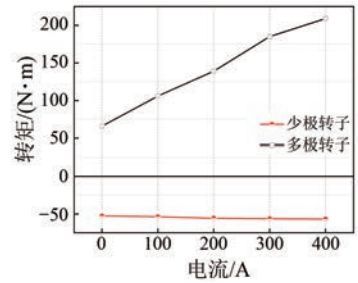


图 8　电流大小与多极输出转矩的关系

Fig. 8　Relationship between current magnitude and multi-pole output torque

表 2　相关参数

Tab. 2　Relevant parameters

参数名称	参数符号
少极转子永磁体长度比例	$\tau_h=L_h/L_{PM_h}$
多极转子永磁体长度比例	$\tau_l=L_l/L_{PM_l}$
少极转子厚度/mm	H_h
多极转子厚度/mm	H_l

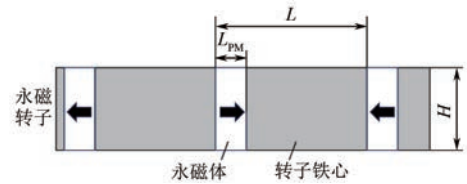


图 9　永磁转子示意图

Fig. 9　Schematic diagram of permanent magnet rotor

图 9 中：L、L_{PM} 分别为在平均直径处转子每一极及永磁体子的长度；H 为转子的厚度；$D_{av}=(D_o-D_i)/2$ 为平均直径；D_i、D_o 分别为电机的内、外径。

通过有限元分析方法得到的结果如图 10 所示。对于多极转子，由图 10(a)可知，其输出转矩随着永磁体长度的增加先大幅度增加而后逐渐放缓；轴向磁拉力始终随着永磁体长度的增加而增加。对于少极转子，由图 10(b)可知，永磁体长度的增加对输出转矩的影响相对较小，这是由于少极转子磁场需经过定子调制后才间接影响到输出转矩。当永磁体长度比例超过 50%后，输出转矩几乎不变，但轴向磁拉力始终接近线性增长。

由图 10(c)、图 10(d)可知，输出转矩先是随着转子厚度的增加迅速增加，当转子厚度超过初

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

始值的 130%后，转矩的增加速率降低；轴向磁拉力始终随转子厚度的增加而增加。

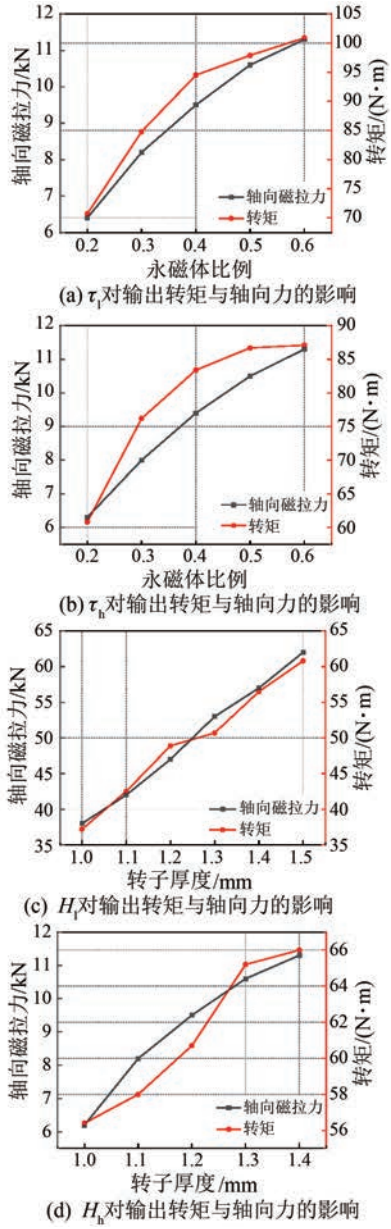


图 10　永磁转子各参数对输出转矩与轴向磁拉力的影响

Fig. 10　Influence of parameters of permanent magnet rotor on output torque and axial magnetic pulling force

图 11 进一步分析了两种不同情况下电机定子和两个转子之间的轴向力。

由图 11 可知，两个转子与定子之间的轴向力大小有所差异，这是由于两个转子上的永磁体数目不一致造成的，两个转子具有不同的极对数，导致定子两侧的气隙磁通密度大小不同。并且在负载条件下，电枢绕组中通入的电流在气隙中产生

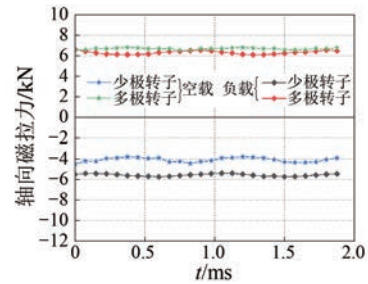


图 11　空载和负载条件下的轴向力分析

Fig. 11　Axial force analysis at no-load and on-load

气隙磁密，对少极转子与定子之间的轴向力产生了影响，而多极转子一侧的轴向磁拉力由于两者的 d 轴与绕组 A 相轴线对齐，因此和在空载条件下的轴向力相比差距较小。

由以上分析可知，两侧转子永磁体对输出转矩的影响并不一致，但对轴向磁拉力的影响比较接近，这对优化输出转矩和平衡磁拉力提供了思路。

5　结语

本文结合轴向磁通电机与磁齿轮的特性，提出了一种聚磁式转子轴向磁齿轮复合电机结构，并对其进行了有限元分析，得出以下结论：

（1）聚磁式转子轴向磁齿轮复合电机实现了磁齿轮和永磁电机磁路的完全复用，有利于实现高转矩密度。有限元分析表明了该电机结构的合理性，并且有限元分析结果表明通入电流会对输出转矩造成不同大小的增幅，在本文中输出转矩提升了约 100%。

（2）轴向磁齿轮复合电机两侧转子参数对输出转矩的影响并不一致，但对轴向磁拉力的影响比较接近，这为进一步优化电机结构提供了理论参考。

参 考 文 献

[1] 赵纪龙，逯卓林，韩青峰，等. 轴向磁通永磁电机系统及关键技术前沿发展综述[J]. 中国电机工程学报，2022，42(7)：2744-2765.
ZHAO J L，LU Z L，HAN Q F，et al. An overview on development of axial flux permanent magnet motor system and the key technology [J]. Proceedings of the CSEE，2022，42(7)：2744-2765.

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

[2] 袁晓明，庞浩东，高鸿发，等. 磁场调制型磁齿轮研究综述[J]. 机械工程学报，2023，59(11)：1-17.
YUAN X M，PANG H D，GAO H F，et al. Research overview on field modulated magnetic gear [J]. Journal of Mechanical Engineering，2023，59(11)：1-17.

[3] 陈栋，王敏，易靓，等. 磁齿轮复合永磁电机综述[J]. 电机与控制应用，2015，42(3)：1-6.
CHEN D，WANG M，YI L，et al. Recent advances on magnetic-geared-integrated permanent magnet machine [J]. Electric Machines & Control Application，2015，42(3)：1-6.

[4] 程明，文宏辉，花为，等. 电机气隙磁场调制统一理论及其典型应用[J]. 中国电机工程学报，2021，41(24)：8261-8283.
CHENG M，WEN H H，HUA W，et al. General airgap field modulation theory for electrical machines and its typical applications [J]. Proceedings of the CSEE，2021，41(24)：8261-8283.

[5] 葛研军，万宗伟，王雪，等. 新型永磁复合电机的设计与优化[J]. 电机与控制应用，2018，45(6)：51-55.
GE Y J，WAN Z W，WANG X，et al. Design and optimization of new permanent magnet compound motor [J]. Electric Machines & Control Application，2018，45(6)：51-55.

[6] DRAGAN R S，CLARK R E，HUSSAIN E K，et al. Magnetically geared pseudo direct drive for safety critical applications [J]. IEEE Transactions on Industry Applications，2019，55(2)：1239-1249.

[7] JANSEN R H，BOWMAN C，CLARKE S，et al. NASA electrified aircraft propulsion efforts [J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology，2019，92(5)：667-673.

[8] KJAER A，KORSGAARD S，NIELSEN S，et al. Design，fabrication，test，and benchmark of a magnetically geared permanent magnet generator for wind power generation [J]. IEEE Transaction on Energy Conversion，2020，35(1)：24-32.

[9] MCGILTON B，CROZIER R，MCDONALD A，et al. Review of magnetic gear technologies and their applications in marine energy [J]. IET Renewable Power Generation，2018，12(2)：174-181.

[10] 俞东. 永磁游标轮毂电机的设计与研究[D]. 杭州：浙江大学，2019.
YU D. Design and analysis of permanent magnet vernier machine for in wheel traction application [D]. Hangzhou：Zhejiang University，2019.

[11] 黄海林，李大伟，曲荣海，等. 磁齿轮复合永磁电机拓扑及应用综述[J]. 电工技术学报，2022，37(6)：1381-1397.
HUANG H L，LI D W，QU R H，et al. A review of magnetic geared machines：Topologies and applications [J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2022，37(6)：1381-1397.

[12] 张东，邹国棠，江建中，等. 新型外转子磁齿轮复合电机的设计与研究[J]. 中国电机工程学报，2008，28(30)：67-72.
ZHANG D，ZOU G T，JIANG J Z，et al. Design and research of a novel magnetic-geared outer-rotor compact machine [J]. Proceedings of the CSEE，2008，28(30)：67-72.

[13] ATALLAH K，RENS J，MEZANI S，et al. A novel ‘pseudo’ direct-drive brushless permanent magnet machine [J]. IEEE Transactions on Magnetics，2008，44(11)：4349-4352.

[14] 周一览，刘晓，黄守道，等. 三种充磁方式轴向磁齿轮的磁场和转矩特性比较[J]. 微特电机，2020，48(1)：1-5+11.
ZHOU Y L，LIU X，HUANG S D，et al. Comparison of magnetic field and torque characteristics of axial magnetic gears with three magnetization methods [J]. Small & Special Electrical Machines，2020，48(1)：1-5+11.

[15] KOUHSHAHI M B，ACHARYA V M，MATTHEW C，et al. Designing and experimentally testing a flux-focusing axial flux magnetic gear for an ocean generator application [J]. IET Electric Power Applications，2019，13(8)：1212-1218.

[16] NIELSEN S，HOLM R，RASMUSSEN P，et al. Conveyor system with a highly integrated permanent magnet gear and motor [J]. IEEE Transactions on Industry Applications，2020，56(3)：2550-2559.

[17] JOHNSON M，GARDNER M C，TOLIYAT H A. Design and analysis of an axial flux magnetically geared generator [J]. IEEE

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

Transactions on Industry Applications，2017，53(1)：97-105.

[18] TALLERICO T F，SCHEIDLER J J，ANDREW S. Design study of double-sided axial-flux magnetically-geared motors for electric aircraft applications [C] // AIAA Propulsion and Energy Forum，Denver，CO，2021.

[19] ATALLAH K，HOWE D. A novel high performance magnetic gear [J]. IEEE Transactions on Magnetics，2001，37(4)：2844-2846.

[20] 黄海林. 多工作磁动势磁场调制电机理论分析与拓扑研究[D]. 武汉：华中科技大学，2021.
HUANG H L. Theoretical analysis and topology investigation of multiple-working-mmf flux modulation machines [D]. Wuhan：Huazhong University of Science and Technology，2021.

[21] ZHU X Y，SUN Y B，LI Q，et al. A novel magnetic-geared doubly salient permanent magnet machine for low-speed high-torque applications [C] // 2011 International Conference on Electrical Machines and Systems，Beijing，2011.

[22] ZHENG P，SONG Z Y，BAI J G，et al. Research on an axial magnetic-field-modulated brushless double rotor machine [J]. Energies，2013，6(9)：4799-4829.

[23] CHENG M，HAN P，DU Y，et al. A tutorial on general air-gap field modulation theory for electrical machines [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics，2022，10(2)：1712-1732.

[24] ZHU Z Q，KHATAB M F H，LI H Y，et al. A novel axial flux magnetically geared machine for power split application [C] // 2017 Twelfth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies，Monte Carlo，2017.

收稿日期：2024-04-08
收到修改稿日期：2024-05-07

作者简介：

徐航(1998－)，男，硕士研究生，研究方向为电机电磁设计及其仿真，xu_hang_2023@163.com；

* 通信作者：黄平林(1976－)，男，博士，高级工程师，研究方向为机电控制、特种电机开发及电力电子技术，pinglinhuang@ujs.edu.cn。

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

 DOI: 10.12177/emca.2024.073

Study on an Axial Magnetic Gear Composite Motor with Spoke-Type Rotor by Finite Element Method

XU Hang, HUANG Pinglin*

(College of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Key words: axial flux motor; magnetic gear; magnetic field modulation; finite element analysis; spoke-type rotor structure

In this paper, a composite motor structure based on an axial magnetic gear with a yokeless structure of axial flux motor of spoke-type rotor is proposed, as shown in Fig.1.

Firstly, the basic principle of axial magnetic gear and composite motor is introduced at the paper. Subsequently, the magnetic field of the motor is analyzed in different cases by finite element analysis software, and the analysis results verify the feasibility and reasonableness of the structure by comparing with the theory in the previous paper.

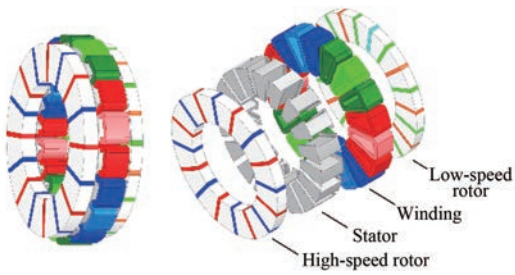


Fig. 1 Three-dimensional model of a polymagnetic axial magnetic gear composite motor

Further, the torque characteristics of the structure in different cases are analyzed, and the results shown in Fig.2 indicate that the torque of the composite motor can be greatly improved, and the analysis results are consistent with the theory. And, comparing the relationship between the torque of the two rotors as a function of current for different magnitudes of current, the results show that the output torque is close to a linear trend with the magnitude of the current, while there is essentially no effect on the torque on the other side.

Finally, the following conclusions are drawn:

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

 DOI: 10.12177/emca.2024.073

(1) The polymagnetic axial magnetic gear composite motor achieves the complete multiplexing of magnetic gear and permanent magnet motor magnetic circuit, which is conducive to achieving high torque density, and the finite element analysis shows the reasonableness of the structure and the through-current will be increased by different sizes of output torque, and the output torque is enhanced by about 100% in this paper.

(2) The study shows that the rotor parameters on both sides of the axial magnetic gear composite motor do not have the same effect on the output torque, but the effect on the axial magnetic pull force is relatively close, which provides a theoretical reference for further optimising the motor structure.

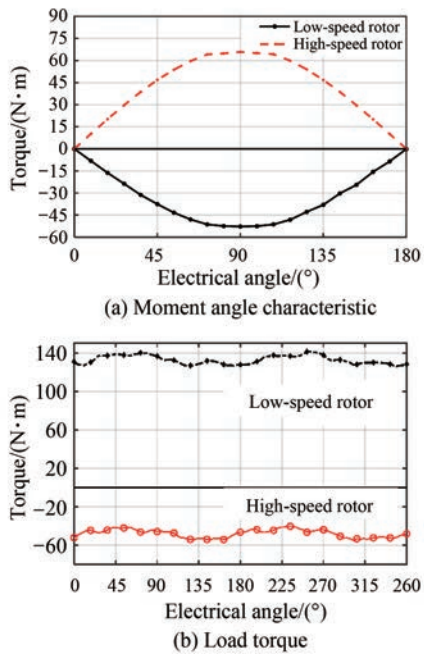


Fig. 2 Torque characteristics

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.