

Halbach同心式永磁齿轮结构优化设计研究

施嘉濠

上海理工大学机械工程学院, 上海

收稿日期: 2022年11月13日; 录用日期: 2023年1月4日; 发布日期: 2023年1月11日

摘要

永磁齿轮作为一种新型传动机构, 在风力发电以及机器人领域有很大发展前景。本文对Halbach同心式永磁齿轮进行了二维建模, 使用COMSOL有限元分析软件进行了二维静态以及动态分析, 得到了机构的磁力线分布图以及气隙磁密波形。针对Halbach同心式永磁齿轮耦合转矩过低的问题对机构重要几何参数进行了数值优化, 并且对优化前后的气隙磁密波形, 耦合转矩进行了对比。结果表明对于几何结构的优化设计可以显著提高耦合转矩。

关键词

永磁机构, Halbach阵列, 有限元分析

Research on Structural Optimization Design of Halbach Concentric Permanent Magnet Gear

Jiaohao Shi

School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Nov. 13th, 2022; accepted: Jan. 4th, 2023; published: Jan. 11th, 2023

Abstract

As a new type of transmission mechanism, permanent magnet gear has a great prospect in the field of wind power generation and robot. In this paper, the two-dimensional modeling of Halbach concentric permanent magnet gear is carried out, and the two-dimensional static and dynamic analysis is carried out using COMSOL finite element analysis software. The magnetic force line distribution diagram and air gap magnetic density waveform of the mechanism are obtained. Aiming at the problem of low coupling torque of Halbach concentric permanent magnet gear, the important geo-

metric parameters of the mechanism were optimized numerically, and the air gap magnetic density waveform and coupling torque before and after optimization were compared. The results show that the coupling torque can be significantly improved by optimizing the geometric structure.

Keywords

Permanent Magnet Mechanism, Halbach Array, Finite Element Analysis

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

同心式磁力齿轮作为一具有良好发展前景的传动装置,最早由 D. Howe 教授于 2001 年提出[1], 一经提出便受到了国内外学者广泛关注。其作为磁力传动装置的一种, 具有无摩擦, 低噪声, 过载保护等优点, 同时该齿轮基于磁场调制原理, 在内转子与外转子之间加入了调磁环, 因此同心式磁力齿轮相较于其它磁力齿轮机构具有高永磁体利用率, 高转矩密度等优点, 其转矩密度可达 $100 \text{ KN}\cdot\text{m}/\text{m}^3$ [1] [2], 远远高于传统磁力齿轮, 因此其在风力发电以及机器人领域已经有了十分重要的发展。

Halbach 充磁阵列最早由美国科学家 Klaus Halbach 所提出[3], 相比较于传统磁力齿轮机构中永磁体的径向充磁方式, Halbach 充磁阵列可以使每一个块永磁体都能得到充分利用的利用, 因此大大增加了转矩密度, 其转矩密度达到了 $260 \text{ KN}\cdot\text{m}/\text{m}^3$ [4]。因此 Halbach 充磁阵列在永磁同步电机中也开始得到逐步应用[5] [6]。

本文通过 COMSOL 有限元仿真软件, 首先对同心式 Halbach 充磁阵列齿轮进行二维有限元分析, 分析了气隙之中径向以及切向磁密的分布波形, 之后对 Halbach 同心式磁力齿轮的主要结构参数进行了优化设计, 分析几何结构尺寸对于齿轮径向磁密的影响, 同心式磁力齿轮的耦合转矩有了显著提高。

2. Halbach 同心式齿轮结构及原理

2.1. 结构模型

Halbach 阵列充磁不同于常见的永磁体径向充磁, 其相邻永磁体之间的充磁方向成固定角度, 目前常见的充磁夹角一般取值为 45° 或者 90° , 图 1 中展示了传统径向充磁与 Halbach 阵列充磁之间的区别。图 1 中所展示的 Halbach 的充磁夹角为 90° 。

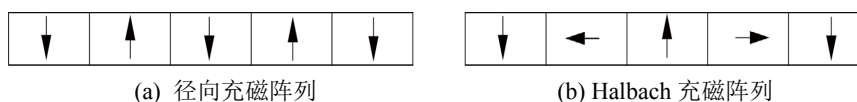


Figure 1. Radial magnetizing array and Halbach magnetizing array

图 1. 径向充磁阵列与 Halbach 充磁阵列

本文所研究的同心式磁齿轮二维结构模型如图 2 所示, 图中黑色箭头表示永磁体充磁方向, Halbach 充磁阵列的夹角取值为 45° , 内转子与外转子上永磁体的磁极对数分别记为 p_1 、 p_2 , 每一磁极所包含的永磁体个数记为 m 。图中红色区域表示调磁环, 由高磁导率的硅钢片组成, 其个数记为 p_t 。 R_1 表示外转子

上永磁体阵列的内径, R_2 表示内转子上永磁体阵列的外径。 R_3 、 R_4 分别表示调制环的内径以及外径。 g_i 表示调制环与内转子永磁体之间的气隙长度, g_o 表示调制环与外转子永磁体之间的气隙长度。 h_m 、 h_t 分别表示永磁体的厚度以及调制环的厚度。 根据几何形状可知, 其中部分参数满足下式, 式(2)中的 p 表示永磁体磁极对数。 θ_m 表示每一块扇形永磁体在圆周上所占的角度。

$$R_1 = R_2 + g_i + h_t + g_o \quad (1)$$

$$\theta_m = \frac{360^\circ}{2pm} \quad (2)$$

对于调制环个数的设计, 需要满足下式(3), 否则会导致气隙磁场的波形混乱, 耦合力矩下降, 传动比出现错误。

$$p_i = p_1 + p_2 \quad (3)$$

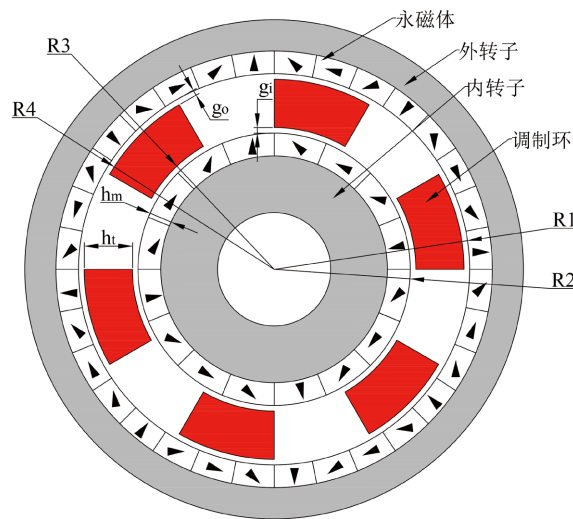


Figure 2. Two dimensional model diagram of Halbach concentric permanent magnet gear

图 2. Halbach 同心式永磁齿轮二维模型图

2.2. 解析模型

对于 Halbach 同心式永磁齿轮, 其磁化强度 \mathbf{M} 可以通过以下式(4)~(8)进行计算[7]。

$$\mathbf{M} = M_r \mathbf{r} + M_\theta \boldsymbol{\theta} \quad (4)$$

$$M_r = \sum_{n=1,3,5}^{\infty} M_{rn}(n) \cos[np(\theta - \theta_0)] \quad (5)$$

$$M_\theta = \sum_{n=1,3,5}^{\infty} M_{\theta n}(n) \sin[np(\theta - \theta_0)] \quad (6)$$

$$M_{rn}(n) = \frac{4B_r}{\mu_0 \pi} \cdot \frac{1}{n} \sin\left(\frac{n\pi}{2n}\right) \cdot \left\{ 1 + \sum_{k=2}^m \cos\left[\frac{\pm(k-1)\pi}{m}\right] \cdot \cos\left[\frac{(k-1)\pi}{m}\right] \right\} \quad (7)$$

$$M_{\theta n}(n) = \frac{4B_r}{\mu_0 \pi} \cdot \frac{1}{n} \sin\left(\frac{n\pi}{2n}\right) \cdot \left\{ \sum_{k=2}^m \sin\left[\frac{\pm(k-1)\pi}{m}\right] \cdot \sin\left[\frac{(k-1)\pi}{m}\right] \right\} \quad (8)$$

上式中取“+”号表示外转子上的永磁体，“-”号表示内转子上的永磁体； B_r 表示永磁体的剩余磁通密度； μ_0 表示真空磁导率。

计算得到径向磁化强度以及切向磁化强度之后 M_r ， M_θ 之后，可以根据文献[8]所给出的方法进行求解，所需求解区域在极坐标下的拉普拉斯方程为：

$$\frac{\partial^2 A}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\delta A}{\delta r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 A}{\partial \theta^2} = \frac{\mu_0}{r} \left(\frac{\partial M_r}{\partial \theta} - M_\theta \right) \quad (9)$$

通过式(9)可以求得矢量磁位 A ，进一步对矢量磁位求偏导可以分别得到气隙磁场径向磁密 B_r^g ，气隙磁场径向磁密 B_θ^g 。求得气隙中的径向以及切向磁密之后，通过应用麦克斯韦应力张量方程[9]，可以求得由气隙磁场所产生的耦合扭矩。

$$T_m = \frac{L_{ef}}{\mu_0} \int_0^{2\pi} r^2 B_r^g B_\theta^g d\theta \quad (10)$$

式(10)中 T_m 表示磁力齿轮机构的耦合扭矩； L_{ef} 表示磁力齿轮机构的轴向长度； r 表示气隙中任意一个与内外转子同心圆的半径。

3. Halbach 同心式磁力齿轮有限元仿真

3.1. 二维有限元模型建立

本文所研究的 Halbach 同心式磁力齿轮二维模型各主要参数如下表 1 所示。

Table 1. Geometric parameters of 2D model

表 1. 二维模型几何参数

参数名称	参数值(mm)
外转子内径 R_1	69
外转子磁极对数 p_1	4
内转子外径 R_2	48
内转子磁极对数 p_2	2
每极永磁体个数 m	4
内转子侧气隙长度 g_i	2
外转子侧气隙长度 g_o	2
调制环内径 R_3	50
调制环厚度 h_t	17
永磁体厚度 h_m	8
机构轴向长度 L_{ef}	30
调制环个数 p_t	6

本文所建立的模型中，内外转子上的永磁体选用 N35 型永磁体，作为目前永磁机构研究广泛使用的永磁体型号，该永磁体的剩余磁通密度可以达到 1.21T，最高工作温度可以达到 150℃。调制环的材料选用热轧硅钢片，其相对磁导率可以达到 5000~7000，因此将其作为调制环置于气隙之中可以有效的对气隙磁场进行调制。

本文使用 COMSOL 有限元仿真软件对二维模型进行仿真。在进行有限元分析时，不同的网格形状以及大小会影响有限元分析结果的精度，这可能会极大的影响后续整体结构的优化。因此本文选用三角形网格进行剖分，最大单元尺寸设置为 1.24 mm。网格的单元数量为 12,964，如下图 3 所示。

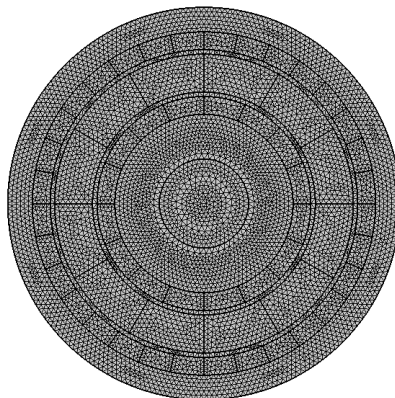


Figure 3. Halbach concentric permanent magnet gear 2D model mesh sectional drawing

图 3. Halbach 同心式永磁齿轮二维模型网格剖分图

3.2. 有限元分析结果

对于 Halbach 同心式永磁齿轮，气隙磁场的分布以及大小是影响机构转矩的关键因素。二维有限元分析的磁力线分布如下图 4 所示，从图中可以看出，磁力线的分布主要集中于高磁导率的材料中。调制环的存在可以使得内转子与外转子之间的磁阻大大减少，降低了磁能的损耗。

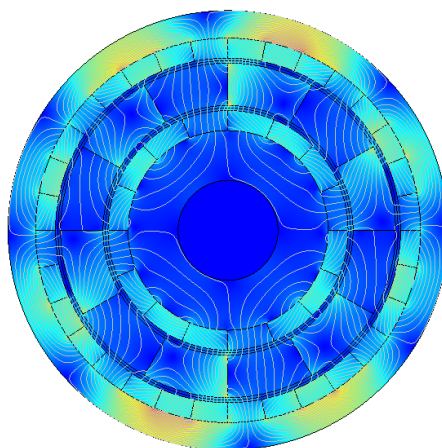


Figure 4. Two dimensional magnetic line distribution diagram of Halbach concentric permanent magnet gear

图 4. Halbach 同心式永磁齿轮二维磁力线分布图

气隙中的磁通密度的大小会直接影响传动转矩的大小，内层气隙以及外层气隙中的径向以及切向磁密如图 5 所示。从图中可以看出切向磁通密度的值小于径向磁通密度。固定外转子以及调制磁环的位置，将内转子逆时针旋转 180°后的内转子以及外转子的矩角特性如图 6 所示。从图中可以看出转矩的变化波形近似于正弦波，转矩的变化周期为 π ，外转子的扭矩幅值是内转子扭矩幅值的 2 倍。

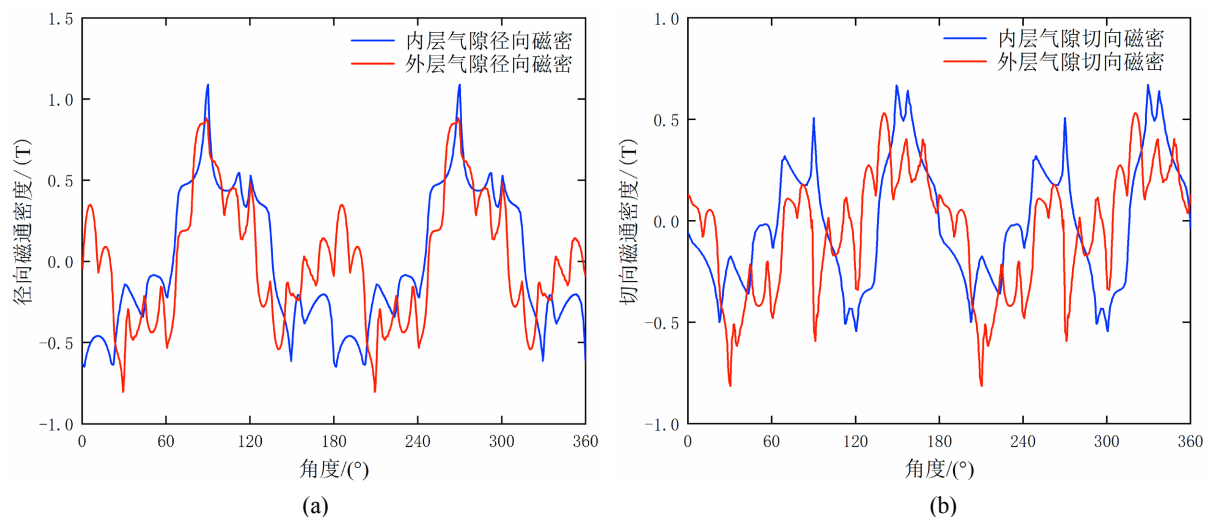


Figure 5. Halbach concentric permanent magnet gear air gap radial and tangential magnetic density
图 5. Halbach 同心式永磁齿轮气隙径向以及切向磁密

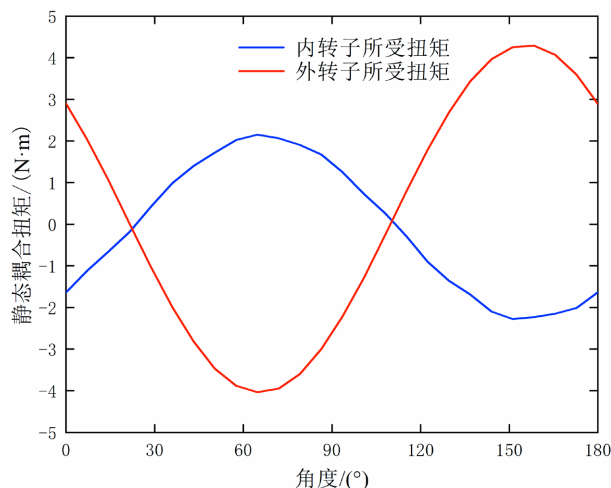


Figure 6. Torque angle characteristics of Halbach concentric permanent magnet gear

图 6. Halbach 同心式永磁齿轮矩角特性

4. Halbach 同心式永磁齿轮结构优化

4.1. 尺寸结构优化设计

遗传算法是目前应用范围十分广泛的一种全局优化算法，尤其在电机结构优化设计中发挥了重要的作用，相比较于其它全局优化算法，遗传算法具有较高鲁棒性的同时对于离散参数的处理也十分迅速并且高效。

对于 Halbach 同心式永磁齿轮，提高耦合转矩是结构设计时的主要考虑的因素，减小气隙长度以及增大永磁体厚度可以很明显的增加耦合转矩，但是由于永磁传动机构的特殊性，过小的气隙长度会增加机构在装配时的困难，过大的永磁体厚度会影响整体机构的整体尺寸以及重量，大尺寸的永磁体也会增加机构的制造成本。因此在有限的体积内增加永磁齿轮的耦合转矩是优化设计的目标。因此目标优化函数可以表示为式(11)，其中 T_m 表示耦合转矩， V 表示永磁齿轮的体积。利用 MATLAB 中的遗传算法优化

工具箱，可以对 Halbach 同心式永磁齿轮的主要几何参数进行优化[10]。

$$\max f(X) = \frac{T_m}{V} \quad (11)$$

经过优化后的电机主要几何参数如下表 2 所示。

Table 2. Geometric parameters after 2D model optimization

表 2. 二维模型优化后几何参数

参数名称	优化前参数值(mm)	优化后数值(mm)
外转子内径 R_1	69	68.4
外转子磁极对数 p_1	4	4
内转子外径 R_2	48	48.8
内转子磁极对数 p_2	2	2
每极永磁体个数 m	4	4
内转子侧气隙长度 g_i	2	1
外转子侧气隙长度 g_o	2	0.8
调制环内径 R_3	50	50.6
调制环厚度 h_t	8.5	8.1
永磁体厚度 h_m	4	4.4
机构轴向长度 L_{ef}	30	30
调制环个数 p_t	6	6

4.2. 优化结果分析

本文中 Halbach 同心式永磁齿轮优化设计前后的关键在于整体体积保持不变，通过调整内外层之间气隙的厚度，永磁体的厚度以及调制环的厚度对其进行优化，利用 COMSOL 对优化后的 Halbach 同心式永磁齿轮进行二维有限元分析并将其与优化之前的数据进行对比的结果如图 7~9 所示。

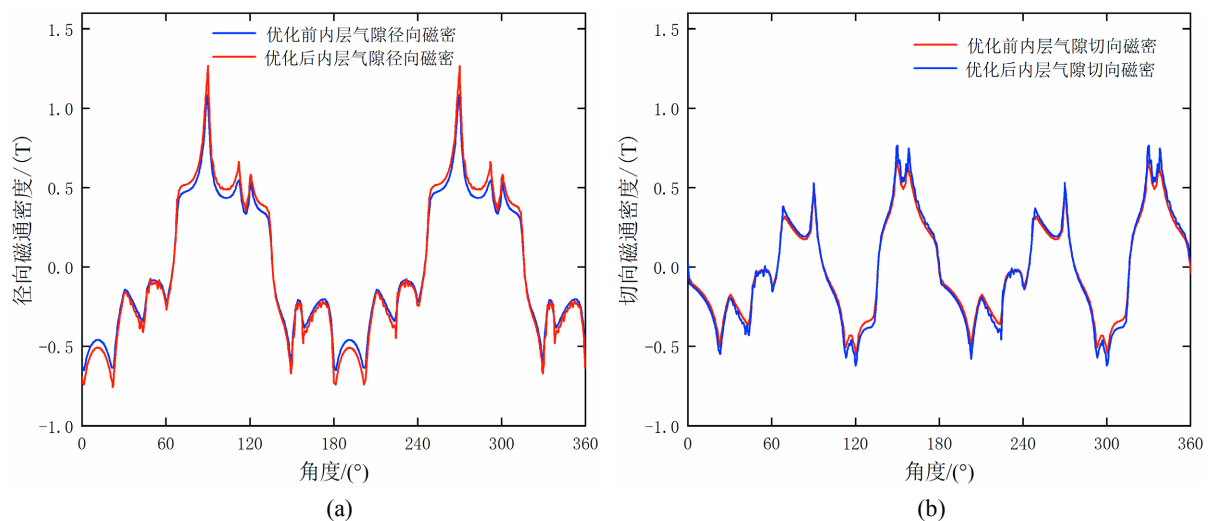


Figure 7. Comparison of radial and tangential magnetic density of inner air gap before and after optimization

图 7. 优化前后内层气隙径向以及切向磁密对比

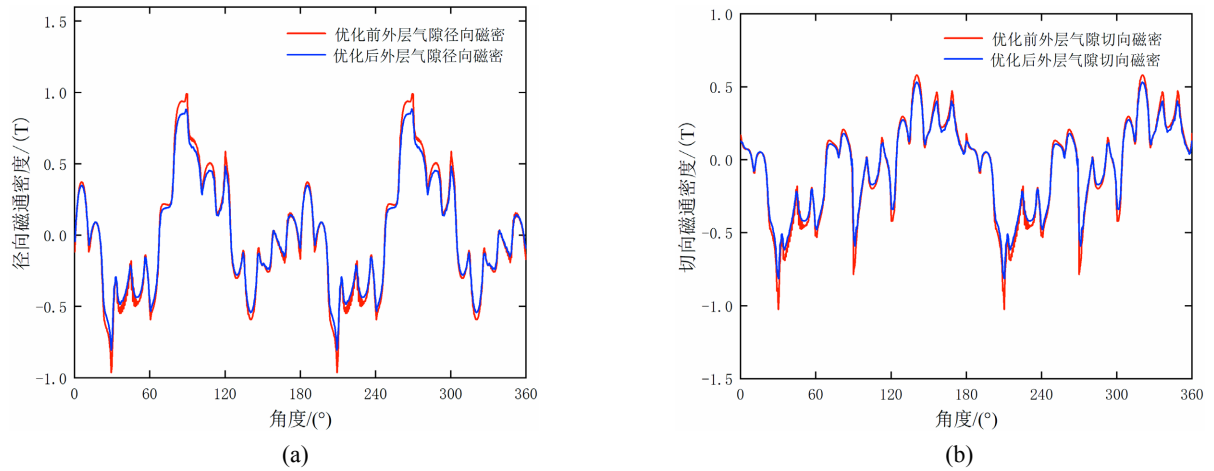


Figure 8. Comparison of radial and tangential magnetic density before and after optimization
图 8. 优化前后的径向以及切向磁密对比

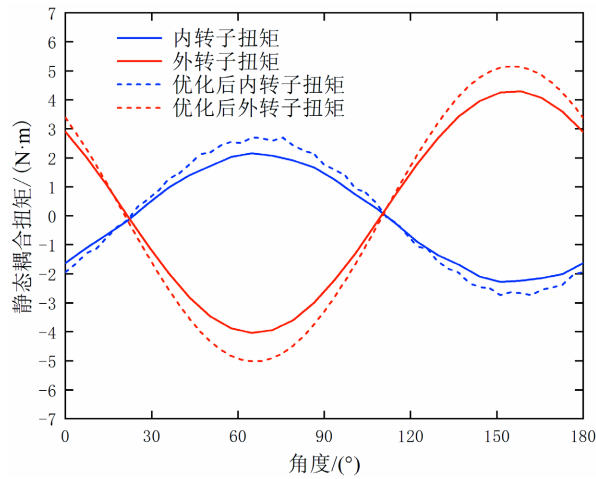


Figure 9. Characteristics of optimized front and rear torque angle of Halbach concentric permanent magnet gear
图 9. Halbach 同心式永磁齿轮优化前后矩角特性

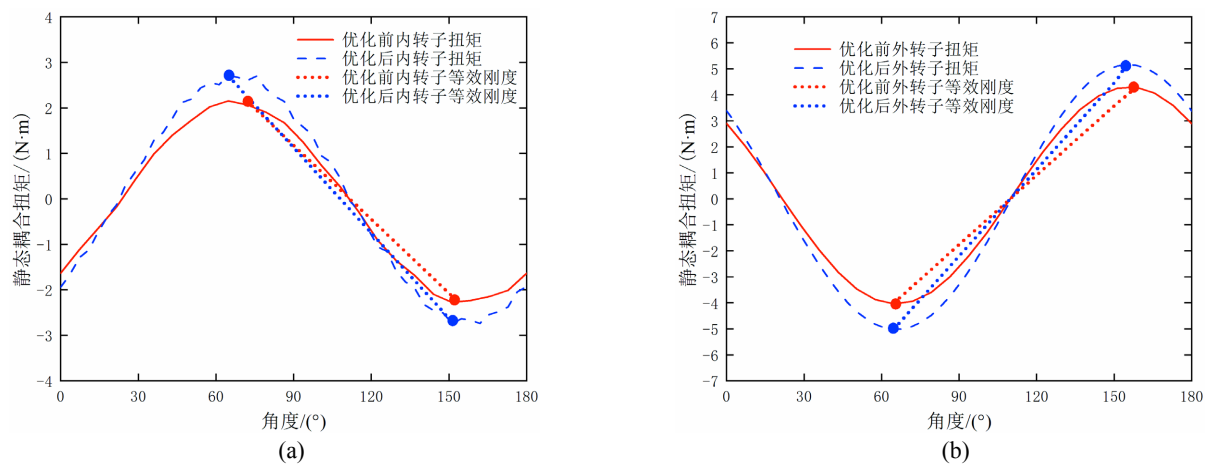


Figure 10. Characteristics of optimized front and rear torque angle of Halbach concentric permanent magnet gear
图 10. Halbach 同心式永磁齿轮优化前后矩角特性

从上各图可以看出, 经过优化之后。内层以及外层气隙的磁通密度波形上并没有发生大的变化, 但是各个取值点的大小有了很大变化。优化之后的内转子以及外转子耦合转矩有了明显提高, 其中耦合扭矩幅值提高了 37%。耦合扭矩成正弦变化, 如果不考虑磁性传动装置因为过载而发生的磁极滑移, 在扭矩变化的稳定区可以通过一条直线进行等效替代, 如下图 10 中的点直线所示, 直线的斜率就是等效刚度。对于内转子, 优化之前的等效刚度为 $3.07 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad}$, 优化之后的等效刚度为 $3.44 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad}$, 增加了 12%。对于外转子, 优化之前的等效刚度为 $5.27 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad}$, 优化之后的等效刚度为 $6.47 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad}$, 增加了 23%。

5. 结论

本文以 Halbach 同心式永磁齿轮为研究对象, 对其进行二维建模。通过 COMSOL 有限元分析软件进行了静态以及动态仿真。并且对其进行了几何机构优化, 通过调整内外层气隙的宽度, 永磁体厚度, 以及调制环的尺寸, 使得机构的耦合扭矩得到了提升, 优化前后的耦合扭矩幅值提升了 37%。通过对耦合扭矩曲线进行线性化得到了磁齿轮在稳定运行状态下的等效刚度, 优化前后的内外抓转子等效刚度都有了显著提升。使其在工作条件下的稳定性得到了提高。

参考文献

- [1] Atallah, K. and Howe, D. (2001) A Novel High-Performance Magnetic Gear. *IEEE Transactions on Magnetics*, **37**, 2844-2846. <https://doi.org/10.1109/20.951324>
- [2] Rasmussen, P.O., Andersen, T.O., Jorgensen, F.T., et al. (2005) Development of a High-Performance Magnetic Gear. *IEEE Transactions on Industry Applications*, **41**, 764-770. <https://doi.org/10.1109/TIA.2005.847319>
- [3] 张好明. Halbach 永磁电动机的计算机辅助设计[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2004.
- [4] 高竹发, 郝伟娜, 周全. Halbach 阵列型摆线永磁齿轮涡流损耗的有限元计算[J]. *机械强度*, 2014, 36(5): 745-751.
- [5] 李梓豪, 张晓明. Halbach 磁极阵列结构在永磁无刷电机的设计应用[J]. *内燃机与配件*, 2021(14): 66-71.
- [6] 高锋阳, 齐晓东, 李晓峰, 袁成, 庄圣贤. 部分分段 Halbach 永磁同步电机优化设计[J]. *电工技术学报*, 2021(4): 787-800.
- [7] 何承平. Halbach 磁齿轮风力发电机的研究与设计[D]: [硕士学位论文]. 镇江: 江苏大学, 2017.
- [8] 井立兵, 章跃进, 李琛, 等. Halbach 阵列同心式磁力齿轮磁场分析与优化设计[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(21): 163-169.
- [9] 王兴华, 励庆孚, 王曙鸿. 永磁无刷直流电机负载磁场及其电磁转矩的计算[J]. *中国电机工程学报*, 2003, 23(4): 140-144.
- [10] 韩力, 李景灿. 应用改进实数编码遗传算法的三相异步电动机优化设计[J]. *中小型电机*, 2005, 32(2): 1-5.