

# 带 Spoke 和凸-T 型结构的 同轴磁齿轮磁场分析与优化

井立兵<sup>1</sup>, 闵泽宇<sup>1</sup>, 王涛<sup>1</sup>, 刘威<sup>2</sup>, 曲荣海<sup>3</sup>

(1. 三峡大学电气与新能源学院微电网工程技术研究中心, 湖北省 宜昌市 443002; 2. 国网冀北电力有限公司承德供电公司, 河北省 承德市 067400; 3. 华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北省 武汉市 430074)

## Magnetic Field Analysis and Optimization of Coaxial Magnetic Gear With Spoke and Convex-T Structure

JING Libing<sup>1</sup>, MIN Zeyu<sup>1</sup>, WANG Tao<sup>1</sup>, LIU Wei<sup>2</sup>, QU Ronghai<sup>3</sup>

(1. College of Electrical Engineering and New Energy, Hubei Provincial Engineering Technology Research Center for Microgrid, China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei Province, China; 2. Chengde Power Supply Company of State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Chengde 067400, Hebei Province, China; 3. Department of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei Province, China)

**ABSTRACT:** To improve the electromagnetic performance of the coaxial magnetic gear (CMG), a novel Halbach array CMG is proposed in this paper. The inner rotor permanent magnets (PMs) adopt convex-T alternating arrangement to form Halbach array, while the outer rotor PMs is a combination of Spoke structure and Halbach array to improve the magnetic concentration effect. In addition, with the optimization objectives of high output torque and low torque ripple under the premise of maintaining the number of PMs, an optimization analysis is conducted based on sensitivity analysis using the response surface method and multi-objective genetic algorithm to determine the optimal parameters of the proposed CMG. A finite element model is established with the 4 and 17 pole pairs for inner and outer rotors, respectively. The proposed CMG can effectively improve the air gap flux density and reduce the non-working harmonics in the air gap, and the output torque is increased by 45.43% and 23.69%, compared with that of conventional and Halbach array CMGs respectively. Finally, a prototype is fabricated, and a test platform is built. The experiment verifies that the torque ratio and transmission ratio of the proposed CMG are basically consistent, and the efficiency can reach over 90%.

**KEY WORDS:** coaxial magnetic gear; Spoke structure; Halbach arrays; multi-objective genetic algorithm (MOGA); torque

**摘要:** 为了提高同轴磁齿轮的电磁性能, 文中提出一种带新型 Halbach 阵列的同轴磁齿轮。内转子永磁体采取凸-T 交替排列形成 Halbach 结构, 外转子永磁体则为 Spoke 结构和 Halbach 阵列的结合, 提高聚磁效果; 此外, 维持永磁体用量的前提下, 以高输出转矩和低转矩脉动为优化目标, 基于灵敏度分析, 采用响应面法和多目标遗传算法进行优化, 确定改进型磁齿轮的优化参数; 建立具有内、外转子极对数分别为 4 和 17 的有限元仿真模型。与传统型和常规型 Halbach 阵列磁齿轮相比, 改进型磁齿轮能有效提高气隙磁密, 降低气隙中非工作谐波, 输出转矩分别提高 45.43% 和 23.69%。最后, 制作样机并搭建测试平台, 实验验证改进型磁齿轮的转矩比与传动比基本保持一致, 且效率可达 90% 以上。

**关键词:** 同轴磁齿轮; Spoke 结构; Halbach 阵列; 多目标遗传算法; 转矩

## 0 引言

近年来, 随着“碳达峰、碳中和”国家战略正式实施, 可再生能源的开发利用呈现加速趋势。风能作为清洁的可再生能源, 近 20 年来得到了广泛的应用。如何安全可靠地将风能转化为电能成为研究的重点<sup>[1-3]</sup>。目前, 一种广泛使用的方法是在发电机和叶轮之间安装一个机械齿轮箱, 以实现将风力涡轮机的低速旋转的动能转化为电能的目的<sup>[4-5]</sup>。然而, 传统机械齿轮箱的传动是通过齿轮之间的物理啮合来实现的, 这会导致额外的能量损失、更短的使用寿命和更高的发电机故障率。

基金项目: 国家自然科学基金项目(52477056)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (52477056).

针对风力发电对低速大转矩的要求,同轴磁齿轮(coaxial magnetic gear, CMG)不仅能够实现类似于机械齿轮的转矩传递,而且故障率较低、可靠性更高,提供了一种有前景的替代方案<sup>[6-7]</sup>。随着CMG的发展,一种磁场调制磁齿轮的设计被提出,此设计在内外转子之间引入一个固定环,使所有永磁体(permanent magnets, PMs)都能有效参与转矩传递,从而显著提高永磁体的利用率和CMG的转矩密度<sup>[8]</sup>。随后,基于磁场调制原理,许多学者致力于的创新研究,涵盖了CMG的拓扑结构、磁场分析、谐波计算和输出转矩<sup>[6,9-10]</sup>。

为了增强磁场调制CMG的电磁特性,永磁体的磁化方式不再局限于径向磁化。采用Halbach阵列、不同形状永磁体等方法来达到一边磁场增强,另一边磁场减弱的效果,得到气隙磁密度的正弦分布。利用其磁屏蔽特性,在降低损耗的同时,转矩密度较传统永磁体得到提高<sup>[10-15]</sup>。通常,采用分段Halbach阵列永磁体可以减小谐波和抑制转矩脉动,提高性能<sup>[15]</sup>。在此基础上,文献[11]提出了一种具有非对称极的新型CMG,其中内转子永磁体由Halbach阵列磁化,外转子永磁体排列采用Spoke结构,该设计转矩密度可进一步提高4.62%。而另一方面,永磁体偏心结构虽然可以减少永磁体用量,但也会增大极间漏磁<sup>[12]</sup>。

在传动系统中,内转子通常为旋转速度较高的一方,为防止永磁体脱落,学者将内转子永磁体从表贴式结构改为Spoke结构,这一变化不仅增强了永磁体的聚磁效应,还提高了CMG的转矩密度<sup>[13]</sup>,同时在高速运转时展现出较高的机械稳定性。进一步地,将内外转子永磁体均采用Spoke结构,成功提升了内外永磁体的聚磁效应,从而进一步提高了CMG的转矩密度<sup>[14]</sup>。然而,当外转子永磁体采用Spoke结构进行切向磁化时,随之而来的永磁体边缘易产生磁通泄漏,影响转矩传递。为解决这一问题,文献[9]提出了一种双磁通调制CMG。通过添加辅助磁通调制器,减少了部分磁通泄漏。当前,永磁体采取Halbach阵列以及Spoke结构可以实现磁通聚焦排列,提高转矩性能<sup>[15-18]</sup>,然而,如何通过进一步的拓扑结构设计在不增加永磁体用量的前提下,得到高转矩密度、低转矩脉动仍然是研究中的关键难题。

以往对于磁齿轮的研究主要集中在不同的拓扑结构性能探索和应用上<sup>[19-20]</sup>,针对于磁齿轮系统

设计优化方面的研究较为缺乏。近年来,利用统计拟合方法对电磁器件进行建模和设计受到了广泛的关注。响应面法(response surface method, RSM)非常适合开发分析模型,并且可以轻松创建具有约束条件的目标函数<sup>[21-22]</sup>。文献[23]为了提高优化效率,提出了设计参数分层的优化概念,并根据设计参数的重要性将其划分为不同的设计层;文献[24]考虑到设计参数的混合不确定性,采用多目标遗传算法(multi-objective genetic algorithm, MOGA)对几何参数进行优化,确定满足优化目标和约束的结构尺寸参数,从而使输出转矩等电磁特性最大化。

为进一步突破转矩限制,本文结合Spoke结构以及Halbach阵列的优点,提出一种内外转子分别采用凸-T型和Spoke结构的Halbach阵列磁齿轮替代风力发电系统中的机械变速箱,在改善磁齿轮电磁特性的基础上进一步提高风力发电系统的工作效率。首先,介绍改进型磁齿轮的拓扑结构和工作原理;以磁齿轮外转子输出转矩和内、外转子转矩脉动为优化目标,对磁齿轮选取的关键尺寸参数进行多目标优化,确定最佳的结构参数;然后,使用有限元分析比较改进型、传统型及常规Halbach型磁齿轮的电磁特性。最后,建立一个样机并进行电磁性能测试。

## 1 拓扑结构及工作原理

### 1.1 传统和改进型磁齿轮的拓扑结构

传统磁齿轮的拓扑结构如图1(a)所示,由两个

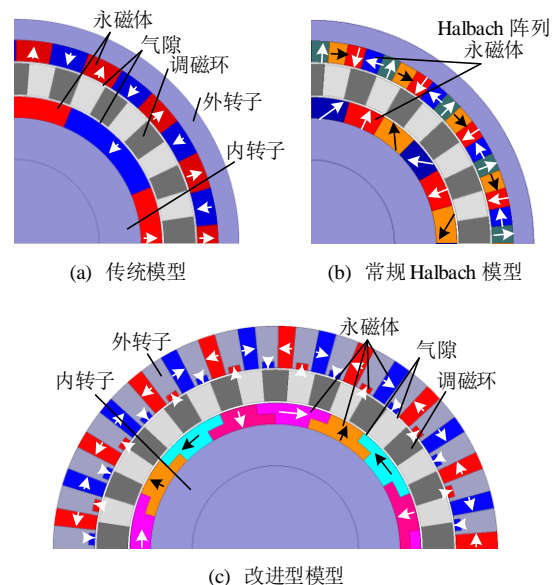


图1 磁齿轮拓扑结构

Fig. 1 Topology of CMGs

转子和一个调磁环组成, 转子表面安装有 PMs, PMs 为表贴式结构<sup>[22]</sup>。调磁环由磁性硅钢块和环氧树脂组成, 夹在两个永磁转子之间。图 1(b)为常规 Halbach 阵列的 CMG 结构, 其内转子 PMs 被分成 3 段, 每段以 60° 间隔磁化, 而外转子由 4 段以 90° 间隔磁化组成, 内外转子皆为 Halbach 阵列结构。

图 1(c)为改进型磁齿轮的拓扑结构。内转子 PMs 呈凸-T 型交替使得 PMs 之间更加稳固且可降低气隙磁密的非工作谐波含量, 形成的 Halbach 阵列结构可获得更接近正弦分布的气隙磁通密度波形。在外转子上, 嵌入的径向充磁的 PMs 和硅钢的 Spoke 式 PMs 形成 Halbach 阵列结构。与普通的聚磁结构相比, 径向充磁的 PMs 可以进一步引导磁力线方向, 提高聚磁效果。改进型磁齿轮的一些关键参数列于表 1。

表 1 改进型磁齿轮初始参数

Table 1 Initial parameters of the proposed CMG

参数	数值	参数	数值
内转子铁心内半径/mm	40	外转子铁心外半径/mm	107
内转子铁心外半径/mm	60	永磁体剩磁/T	1.1
内转子永磁体厚度/mm	10	矫顽力/(kA/m)	-1000
气隙长度/mm	1	轴向长度/mm	60
调磁环厚度/mm	15	内转子极对数	4
外转子铁心内半径/mm	87	外转子极对数	17

## 1.2 工作原理

磁齿轮的内、外转子 PMs 产生的磁场通过调磁环进行调制, 在气隙磁场中产生许多固定的谐波分量。工作谐波用于传递转矩, 非工作谐波则形成转矩脉动。产生的空间谐波次数可表示为

$$p_{m,k} = |kn_s + mp| \quad (1)$$

式中:  $k=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ;  $m=1, 3, 5, \dots$ ;  $n_s$  为调磁环的数量。  $n_s$  与  $p_{in}$ 、 $p_{out}$  的关系为

$$n_s = p_{in} + p_{out} \quad (2)$$

式中:  $p_{in}$  为内转子上的磁极对;  $p_{out}$  为外转子上的磁极对。

气隙中的谐波分量具有特定的极对数和转速, 内外气隙中谐波分量的角速度表示为

$$\Omega_{m,k} = \frac{mp}{mp + kn_s} \Omega_r + \frac{kn_s}{mp + kn_s} \Omega_s \quad (3)$$

式中:  $\Omega_{m,k}$  为空间谐波分量的角速度;  $\Omega_r$  为内、外转子的角速度;  $\Omega_s$  为调磁环的角速度。

当  $k=0$  时, 即不存在磁调制环, 谐波磁场的角

速度等于内外转子的角速度。当  $k \neq 0$  时, 即调磁环存在时, 谐波磁场的角速度和内外转子的角速度不同。由式(3)可知, 谐波分量的角速度为

$$\Omega_{k,-1} = \frac{p}{p - n_s} \Omega_r - \frac{n_s}{p - n_s} \Omega_s \quad (4)$$

内、外转子 PMs 的充磁方向如图 1(c)所示, 每个 PMs 段的充磁方向由式(5)给出:

$$\vec{M} = M_r \vec{r} + M_\theta \vec{\theta} \quad (5)$$

其中  $M_r$  和  $M_\theta$  为:

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

$$M_\theta = \sum_{n=1,3,5}^{\infty} M_{\theta n}(n) \sin[np(\theta - \theta_0)] \quad (7)$$

其中  $M_{rn}$  和  $M_{\theta n}$  为:

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

$$M_{\theta n}(n) = \frac{4B_r}{\mu_0 \pi n} \frac{1}{2m} \sin \frac{n\pi}{2m} \left[ \sum_{k=2}^m \sin \frac{\pm(k-1)\pi}{m} \sin \frac{(k-1)n\pi}{m} \right] \quad (9)$$

式中: “-” 表示内转子; “+” 表示外转子;  $p$  为极对数;  $m$  为每极 PMs 的分块数;  $k$  为每极 PMs 块的第  $k$  块;  $\theta$  为  $x$  轴与每个 PMs 块中心线的夹角;  $B_r$  为 PMs 的剩磁。

## 2 磁齿轮多目标优化设计

磁齿轮具有双层气隙、双转子等特殊结构, 在优化设计过程中, 如何选取满足优化目标和约束条件的设计参数成为了不可避免的问题。此外, 为了减少多个优化目标在同时优化中的相互影响, 又准确地得到改进型磁齿轮的最优设计参数值, 本文采用 RSM 和 MOGA 相结合的多目标优化方法, 对磁齿轮进行优化分析。优化过程如图 2 所示。其中转矩脉动  $k_{rip}$  的定义如下:

$$k_{rip} = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{ave}} \quad (10)$$

式中:  $T_{max}$  为最大输出转矩;  $T_{min}$  为最小输出转矩;  $T_{ave}$  为平均输出转矩。

### 2.1 优化目标和主要参数

考虑到驱动应用领域的特殊要求, 在 CMG 的优化设计中, 输出转矩和转矩脉动始终被认为是重

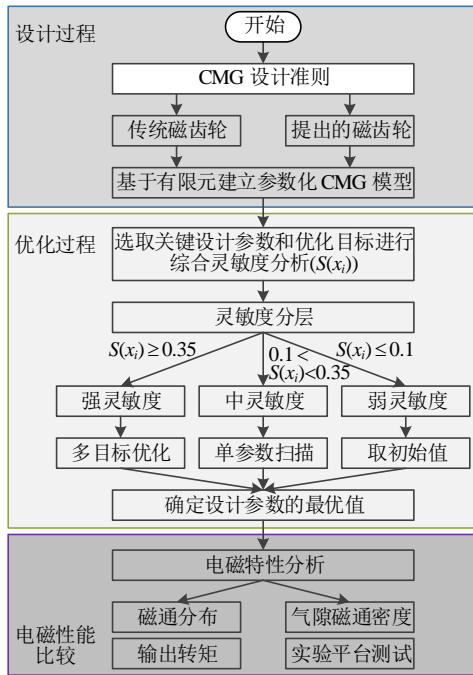


图2 优化设计流程图

Fig. 2 Flowchart of the optimization design

要的电磁特性。且在传动过程中，CMG 的内、外转子的输出转矩始终符合传动比，因此选取磁齿轮的外转子输出转矩以及内、外转子的转矩脉动作为优化目标。相应的目标函数定义为

$$f(x_i) = \lambda_1 \frac{T_{\text{out}}}{f_{T_{\text{out}}}(x_i)} + \lambda_2 \frac{f_{k_{\text{ripo}}}(x_i)}{k_{\text{ripo}}} + \lambda_3 \frac{f_{k_{\text{ripi}}}(x_i)}{k_{\text{ripi}}} \quad (11)$$

式中： $T_{\text{out}}$  为外转子输出转矩平均值； $k_{\text{ripo}}$  和  $k_{\text{ripi}}$  分别为外转子和内转子的转矩脉动。转矩脉动定义为峰峰转矩值与平均转矩值的百分比。

CMG 通常适用于低速、大转矩领域，在本文中，考虑其对高转矩密度要求更高，因此多目标优化函数  $f(x_i)$  中的权重系数  $\lambda_1$  取为 0.6，而  $\lambda_2$  和  $\lambda_3$  都取为 0.2，并且满足  $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 1$  的关系。

在选定优化目标后，选择合理的设计变量并评估这些变量对每个优化目标的影响也是非常重要的。结合改进型磁齿轮的结构尺寸限制，其主要的优化设计变量如图 3 所示。图中： $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  分别为磁齿轮的内转子凸型 PMs、调磁环以及外转子 PMs 的内半径； $S_1$  为外转子 PMs 径向充磁部分的面积，为补偿增加的 PMs 面积  $S_1$ ，对 Spoke 结构的 PMs 进行切割；定义  $S_2$  为切割下来的面积，并且  $S_1$  的面积等于  $S_2$  的面积，且在切割  $S_2$  后，两侧的铁心宽度仍保持中心对称； $c$  为  $S_1$  区域的宽度； $d$  为  $S_2$  区域的角度； $a$ 、 $b$ 、 $h$  分别为内转子凸型 PMs 的凸出弧度、底部厚度以及凸出厚度。设计变量的

优化范围见表 2。

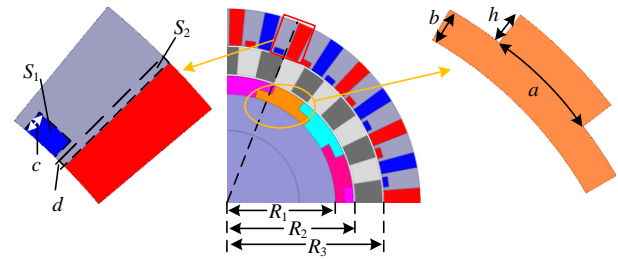


图3 优化参数模型

Fig. 3 Optimization parameters model

表2 设计变量的优化范围

Table 2 Optimization range of design variables

设计变量	变化范围
内转子凸型 PMs 的凸出弧度 $a/^\circ$	[4, 20]
内转子凸型 PMs 的底部厚度 $b/\text{mm}$	[3, 8]
$S_1$ 区域的宽度 $c/\text{mm}$	[3, 7]
$S_2$ 区域的角度 $d/^\circ$	[0.4, 0.8]
内转子凸型 PMs 的凸出厚度 $h/\text{mm}$	[2, 7]
内转子凸型 PMs 的内半径 $R_1/\text{mm}$	[58, 62]
调磁环的内半径 $R_2/\text{mm}$	[70.5, 71.5]
外转子 PMs 的内半径 $R_3/\text{mm}$	[86, 88]

## 2.2 综合灵敏度分析

优化设计过程中，采取综合灵敏度分析通过量化各变量对目标函数的影响，帮助识别关键变量、降低问题维度。同时，它能够避免变量之间的耦合效应兼顾变量非线性，为多目标优化提供决策依据并提高优化效率。设计变量对优化目标的灵敏度指标  $S_j(x_i)$  可表示为

$$S_j(x_i) = \frac{V(E(y_j/x_i))}{V(y_j)} \quad (12)$$

式中： $y_j$  为第  $j$  个设计目标； $x_i$  为第  $i$  个设计变量； $E(y_j/x_i)$  表示  $x_i$  为常数时  $y_j$  的期望值； $V(E(y_j/x_i))$  为  $E(y_j/x_i)$  的方差； $V(y_j)$  为  $y_j$  的方差； $S_j(x_i)$  为第  $i$  个设计变量对第  $j$  个设计目标的灵敏度。

图 4 给出了灵敏度分析结果，可见各设计变量对不同优化目标的影响程度存在差异。为量化每个设计变量的综合影响，引入比例系数  $\lambda$  计算出个设计变量的综合灵敏度并进行分层，表示为

$$S_{\text{com}}(x_i) = \lambda_1 |S_1(x_i)| + \lambda_2 |S_2(x_i)| + \lambda_3 |S_3(x_i)| \quad (13)$$

式中  $S_{\text{com}}(x_i)$  为第  $i$  个设计变量的综合敏感性指数。得到的各设计参数的综合灵敏度指标如表 3 所示。其中相对于其他变量， $x_2$ 、 $x_3$  和  $x_4$  设计变量的综合灵敏度系数较大，为高灵敏度变量。

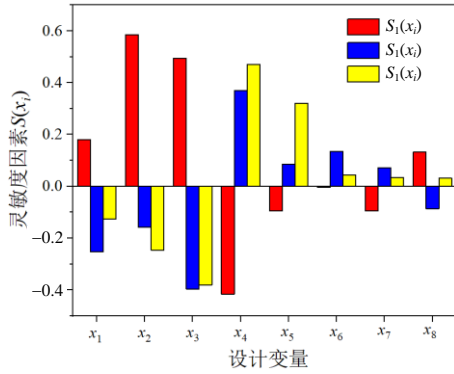


图 4 设计变量敏感度分析结果

Fig. 4 Design variable sensitivity analysis results

表 3 综合敏感性指标

Table 3 Comprehensive sensitivity index

设计变量	优化目标			灵敏度 $S_{com}(x_i)$	
	$ S_1(x_i) , \lambda_1=0.6$	$ S_2(x_i) , \lambda_2=0.2$	$ S_3(x_i) , \lambda_3=0.2$		
$x_1$	$a$	0.181	0.252	0.125	0.184
$x_2$	$b$	0.585	0.157	0.246	0.432
$x_3$	$c$	0.495	0.396	0.381	0.452
$x_4$	$d$	0.416	0.369	0.471	0.418
$x_5$	$h$	0.095	0.086	0.321	0.138
$x_6$	$R_1$	0.003	0.135	0.043	0.055
$x_7$	$R_2$	0.094	0.072	0.033	0.069
$x_8$	$R_3$	0.132	0.086	0.032	0.088

### 2.3 优化目标的响应面模型

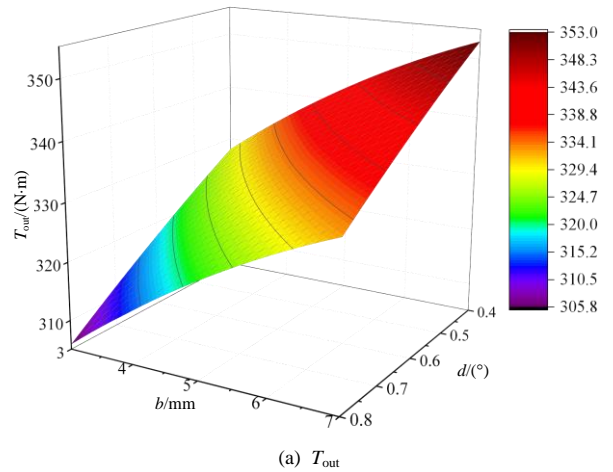
在工程优化设计中，多项式近似模型主要用于描述设计变量与响应目标之间的函数关系。为了清晰、快速地获得响应目标与设计变量之间的变化规律并计算数据，本部分采用响应面模型(box behnken design, BBD)进行分析，该设计在保证二次响应面模型拟合精度的前提下，可减少实验次数，降低实验成本<sup>[24]</sup>。基于灵敏度分析结果，磁齿轮的响应模型可以写成：

$$f(n) = \beta_0 + \sum_{i=1}^3 \beta_i n_i + \sum_{i=1}^3 \beta_{ii} n_i^2 + \sum_{i=1}^2 \sum_{i < j}^3 \beta_{ij} n_i n_j + \delta \quad (14)$$

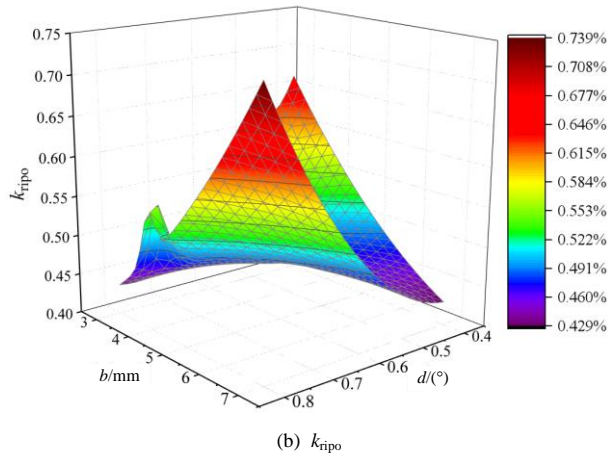
式中： $f(n)$ 为转矩或转矩脉动的预测值； $\beta_0$ 为常数项； $\beta_i$ 、 $\beta_{ii}$ 为设计变量的一次项和二次项系数； $\beta_{ij}$ 为不同设计变量乘积项系数； $n_i$ 、 $n_j$ 为两个不同的设计变量； $\delta$ 为统计误差。

以设计变量  $b$  和  $d$  为例，绘制 3 个优化目标的响应面如图 5 所示。可以看出，随着  $b$  的增大，输出转矩  $T_{out}$  逐渐增大，外转子转矩脉动  $k_{rip0}$  先增大后减小再增大，而内转子转矩脉动  $k_{rip1}$  先平稳波动后增大。随着  $d$  的增大，输出转矩  $T_{out}$  逐渐减小，外转子转矩脉动  $k_{rip0}$  逐渐增大，内转子转矩脉动  $k_{rip1}$

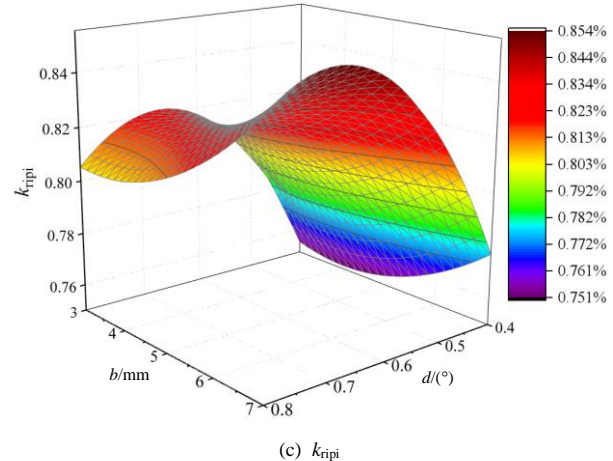
先增大后减小。因此，通过单变量分析很难准确判断设计变量的优化设计值，需要在 3 个优化目标之间进一步合理权衡。



(a)  $T_{out}$



(b)  $k_{rip0}$



(c)  $k_{rip1}$

图 5 3 个优化目标  $T_{out}$ 、 $k_{rip0}$ 、 $k_{rip1}$  关于  $b$  和  $d$  的响应面  
Fig. 5 Responses surface of three optimization objectives  $T_{out}$ ,  $k_{rip0}$ ,  $k_{rip1}$  to  $b$  and  $d$

### 2.4 多目标遗传算法优化

MOGA 是一种非支配排序遗传算法，可以获得一组 Pareto 解。决策者可以根据自己的实际情况选择自己想要的解决方案，具有很好的多样性<sup>[24-25]</sup>。

为了解决多个优化目标之间的折衷问题,将 MOGA 与响应面模型相结合,得到高输出转矩和低转矩脉动目标的候选设计方案,并通过有限元计算遗传算法中个体的电磁性能。这意味着有限元的结果同时传递给优化程序,从而提高优化结果的准确性。图 6 为磁齿轮优化的迭代过程。可以看出,MOGA 算法在 16 次迭代后终止,显示出较高的优化效率。

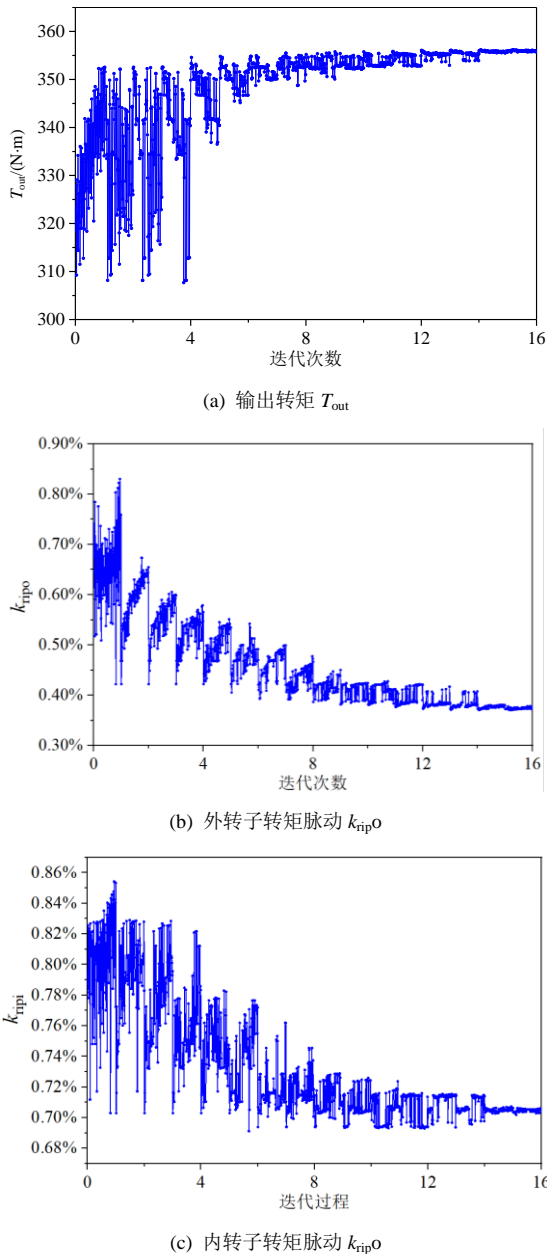


图 6 寻求优化的迭代过程

Fig. 6 Iterative process for seeking optimization

基于收敛结果,图 7 给出了采用 NSGA-II 算法的多目标优化结果。Pareto 前沿为最优候选组合集,MOGA 最终给出 3 个优化设计,即候选设计 1、2 和 3。表 4 列出了改进型磁齿轮设计变量和优化目标对应的最优值及与传统型磁齿轮电磁特性的对

比结果。从有限元精度的分析结果可知,3 个候选设计点的转矩和内转子转矩脉动相差不大。候选点 2 的外转子转矩脉动较传统型磁齿轮减小了 64.68%,其变化幅度大于候选点 1 和 3。因此,选择候选点 2 作为改进型磁齿轮的最终优化设计参数取值。

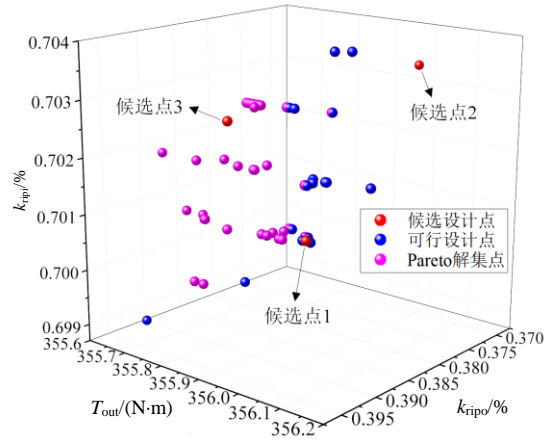


图 7 优化后的可行设计

Fig. 7 Feasible designs after optimization

表 4 选定最优点的磁齿轮性能比较

Table 4 CMG performance comparison of selected optimal points

参数	传统型磁齿轮	改进型磁齿轮		
		候选点 1	候选点 2	候选点 3
$b/\text{mm}$	—	6.986	6.983	6.965
$c/\text{mm}$	—	7.976	7.979	7.981
$d/(\text{°})$	—	0.404	0.404	0.404
$T_{\text{out}}/(\text{N}\cdot\text{m})$	244.793	356.089	356.010	355.911
$k_{\text{ripO}}/\%$	1.051	0.393	0.371	0.394
$k_{\text{ripI}}/\%$	1.972	0.701	0.703	0.703
$(\Delta T_{\text{out}}/T_{\text{out}})/\%$	—	45.46	45.43	45.39
$(\Delta k_{\text{ripO}}/k_{\text{ripO}})/\%$	—	-62.57	-64.68	-62.53
$(\Delta k_{\text{ripI}}/k_{\text{ripI}})/\%$	—	-64.44	-64.33	-64.35

注:  $T_{\text{out}}$ 、 $k_{\text{ripO}}$ 、 $k_{\text{ripI}}$  分别为传统型磁齿轮的输出转矩、外转子转矩脉动和内转子转矩脉动;  $\Delta T_{\text{out}}$ 、 $\Delta k_{\text{ripO}}$ 、 $\Delta k_{\text{ripI}}$  分别为改进型磁齿轮候选点的数值与传统型磁齿轮的输出转矩、外转子转矩脉动和内转子转矩脉动的差值。

### 3 性能分析

为进一步验证多目标优化方法的可靠性和有效性,分别建立了传统型、常规 Halbach 型以及改进型磁齿轮的二维有限元模型。内外转子上极对数分别等于 4 和 17,传动比  $G_T=4.25$ 。通过建模与仿真,对比了 3 种磁齿轮在磁力线分布、气隙磁场、谐波含量、转矩等方面的差异。

#### 3.1 磁力线分布

图 8 为 3 种磁齿轮空载下的磁力线分布。由图

可知，内转子永磁体产生的磁力线一部分与相邻永磁体形成闭环，另一部分则由调磁环调制，并与外转子永磁体产生的磁场耦合形成传动扭矩。与传统磁齿轮相比，常规的 Halbach 型和改进型磁齿轮改变了永磁体的磁化结构，磁力线在内外层气隙处更加集中，有利于转矩的传递。值得注意的是，所提出的具有 Spoke 结构的磁齿轮在外气隙侧表现出更强的磁耦合，要优于常规的 Halbach 型磁齿轮。

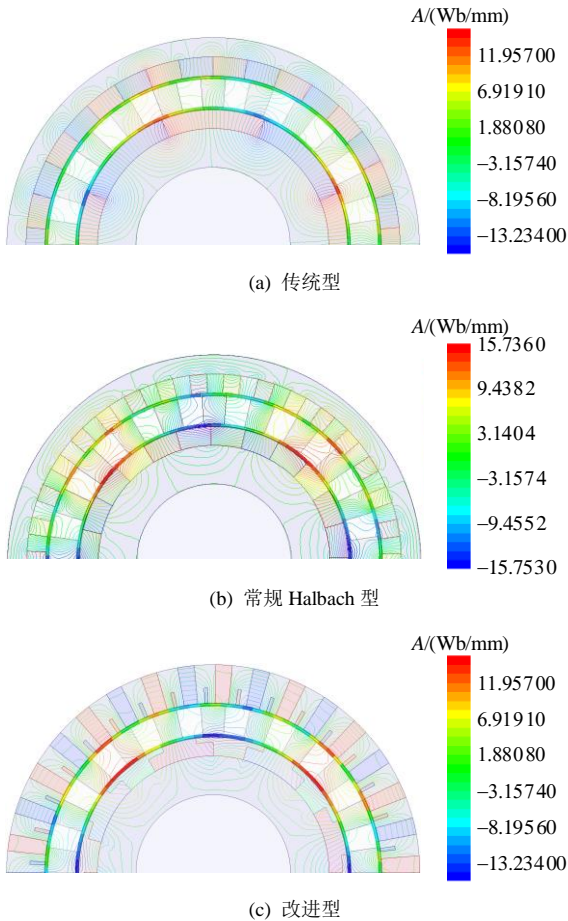


图 8 磁力线分布

Fig. 8 Distributions of flux lines

图 9 为内层气隙径向和切向磁通密度波形对比。可知，对于改进型磁齿轮而言，在改进内转子 PMs 的形状和磁化方式并通过 MOGA 优化后，其径向气隙磁密幅值增大，波形更接近正弦波。图 10 为内层气隙磁通密度的谐波频谱。根据磁场调制理论<sup>[26]</sup>，内转子永磁体极对数为 4，外转子永磁体极对数为 17，4 次和 17 次分别为磁齿轮内外转子永磁体的基波成分。此外根据式(1)、(2)，25 和 38 次谐波则是经过调磁环调制后在内气隙中产生的谐波分量。采取 Halbach 结构的磁齿轮的工作谐波分量比传统磁齿轮大，有利于转矩在内层气隙中的传

输。此外，与传统磁齿轮相比，常规 Halbach 型和改进型磁齿轮在 12、20、28、33、36、41 等次数的非工作谐波分量上表现出显著的抑制效果，特别是，12、20、28 和 36 次谐波幅值的降低，不仅提高了磁场分布的正弦度，还有效减少了磁齿轮的铁耗<sup>[8]</sup>从而提高了磁齿轮的转矩传递效率。

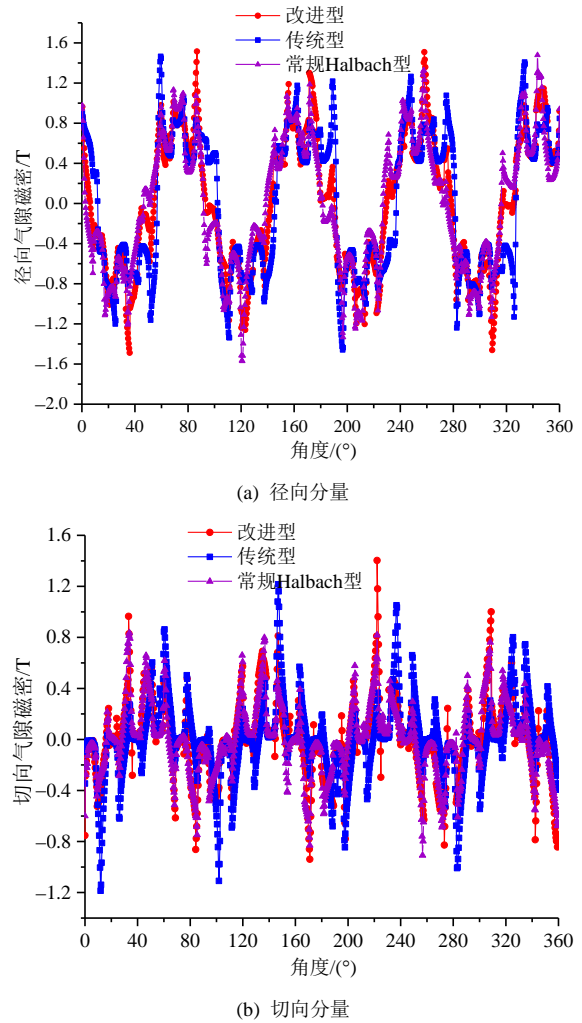
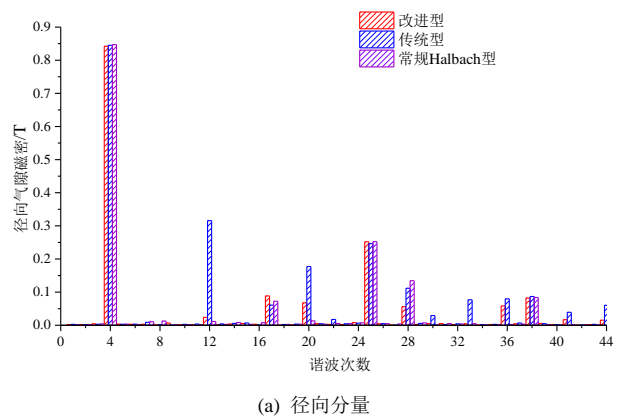


图 9 内层气隙磁通密度分布

Fig. 9 Flux density distributions in the inner air gap

图 11 为外层气隙磁密的波形分布对比。可知，



(a) 径向分量

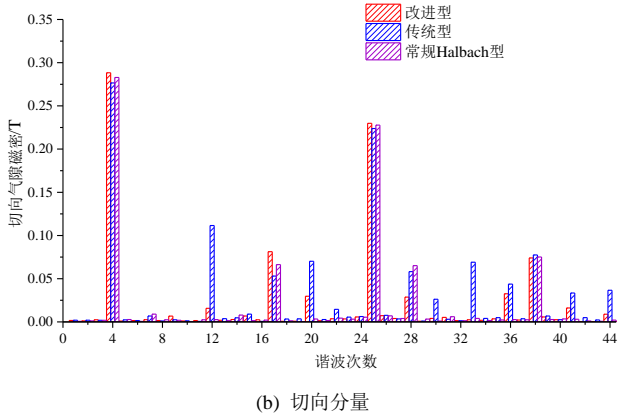


图 10 内层气隙磁通密度的谐波频谱  
Fig. 10 Harmonic spectra of flux density in the inner air gap

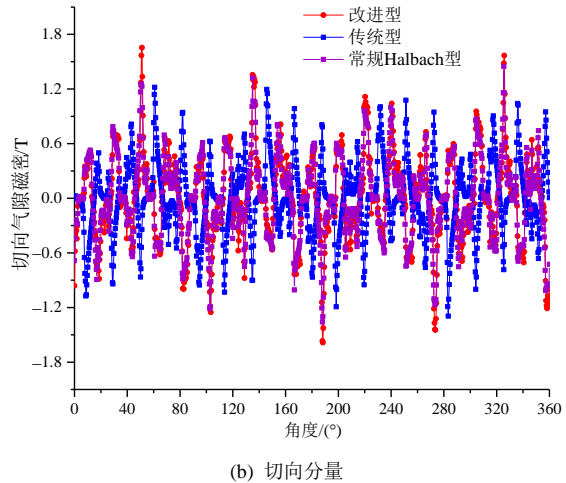
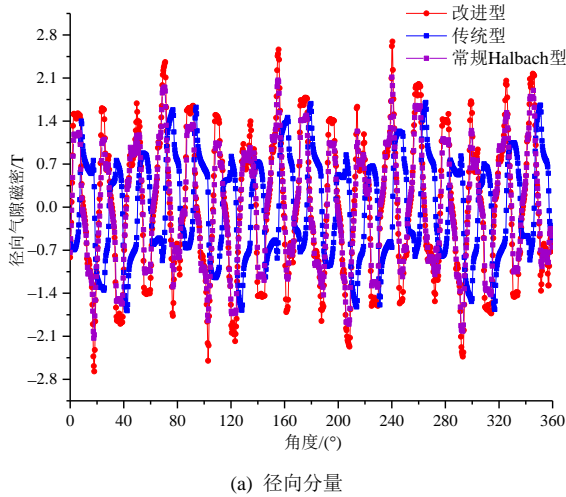


图 11 外层气隙磁通密度分布  
Fig. 11 Flux density distributions in the outer air gap

无论是径向分量还是切向分量，改进型磁齿轮的磁密幅值均显著高于传统型与常规 Halbach 型，验证了改进型磁齿轮在气隙区域磁通耦合方面的优势。外层气隙磁密的谐波频谱结果如图 12 所示，通过对 3 种磁齿轮的谐波成分进行对比分析可以发现，

在 Spoke 结构和 Halbach 阵列的协同作用下，改进型磁齿轮的谐波幅值，特别是第 17 对极的谐波幅值，高于传统型与常规 Halbach 型。因此，在永磁体用量相同的前提下，外转子永磁体的排列与磁化方式相结合强化了工作谐波的贡献，从而提升了改进型磁齿轮的输出转矩性能。

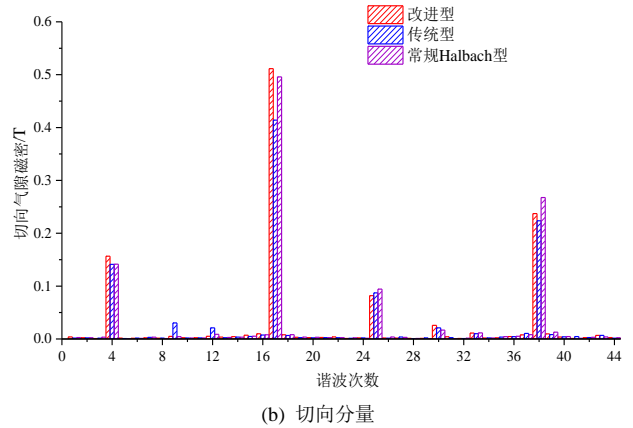
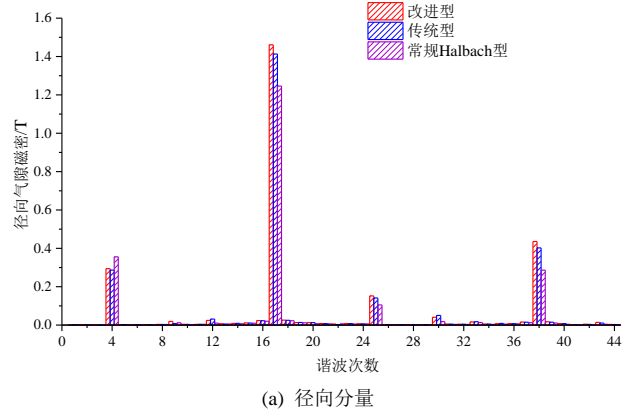


图 12 外层气隙磁通密度的谐波频谱  
Fig. 12 Harmonic spectra of flux density in the outer air gap

### 3.2 转矩和转矩脉动

调磁环保持静止。高速内转子和低速外转子分别以 170 和 40 r/min 反向旋转。内外转子的电磁转矩波形如图 13 所示。改进型磁齿轮外转子的输出转矩为 356.01 N·m，而传统型和常规 Halbach 型磁齿轮的输出转矩为 244.79 和 287.82 N·m，提高了 45.43% 和 23.69%。

表 5 分别列出了 3 种磁齿轮的转矩及转矩脉动系数对比。可知，与传统磁齿轮相比，常规 Halbach 型的和改进型磁齿轮的内转子  $k_{rip}$  显著降低，分别从 1.97% 降低到 0.51% 和 0.70%。同样，外转子的  $k_{rip}$  也从 1.05% 分别降低至 0.33% 和 0.37%。这与气隙磁场的分析结果相一致，采取了 Halbach 阵列结构的磁齿轮得到气隙磁场更加正弦化，有效抑制了

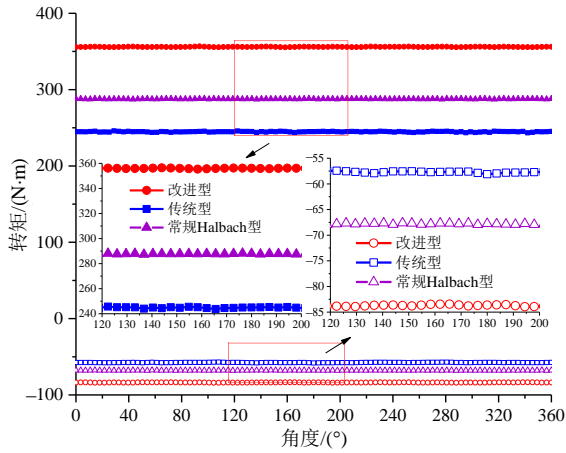


图 13 3 种磁齿轮的输出转矩对比

Fig. 13 Output torque Comparison of three CMGs

表 5 转矩和转矩脉动

Table 5 Torque and torque ripple

类型	最小值/(N·m)	最大值/(N·m)	平均值/(N·m)	转矩脉动/%
I	-56.98	-58.11	-57.56	1.97
内转矩 II	-67.64	-67.99	-67.81	0.51
III	-83.42	-84.04	-83.71	0.70
I	243.38	245.96	244.79	1.05
外转矩 II	287.31	288.27	287.82	0.33
III	355.41	356.72	356.01	0.37

注：I 为传统型；II 为常规 Halbach 型；III 为改进型。

非工作谐波。

在表 6 中对 3 种磁齿轮之间的 PMs 体积、转矩密度和质量等参数进行了额外的分析和比较。在相同的 PMs 质量条件下，与传统磁齿轮相比，由于 Halbach 阵列结构的磁齿轮具有更低的铁损，使得常规 Halbach 型和改进型磁齿轮的总损耗降低。此外，在相同的磁齿轮体积下，常规 Halbach 型磁齿轮的转矩密度从  $131.89 \text{ kN}\cdot\text{m}/\text{m}^3$  提高至  $155.08 \text{ kN}\cdot\text{m}/\text{m}^3$ ，而改进型磁齿轮的转矩密度则可进一步提升至  $191.82 \text{ kN}\cdot\text{m}/\text{m}^3$ 。

表 6 3 种磁齿轮的定量比较

Table 6 Quantitative comparison between three CMGs

参数	传统型	常规 Halbach 型	改进型
磁齿轮体积/ $(\times 10^{-3} \text{ m}^3)$	1.856	1.856	1.856
PMs 质量/kg	4.38	4.38	4.38
总损耗/W	78.32	59.51	61.52
外转子输出转矩/(N·m)	244.79	287.82	356.01
转矩密度/ $(\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m}^3)$	131.89	155.08	191.82

#### 4 样机实验

为了验证改进型磁齿轮的电磁特性，图 14 给出了样机和测试平台的部分照片。主要实验包括转

矩比、空载损耗和传动效率测试。

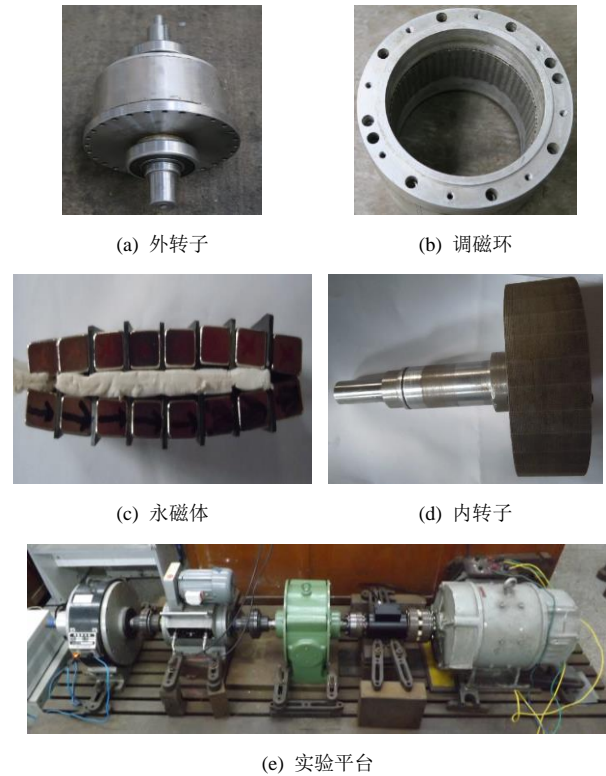


图 14 样机及实验平台

Fig. 14 Prototype and test platform

磁齿轮转矩比与输出转速之间的关系如图 15 所示。在相对高速范围内，不同负载下的转矩比与传动比基本保持一致。而在较低速范围内，由于样机启动时转速和负载变化较快，同时受到机械摩擦和定位力矩等因素的影响，导致转矩比相较于传动比出现小幅波动，但整体变化仍保持在可接受范围内。

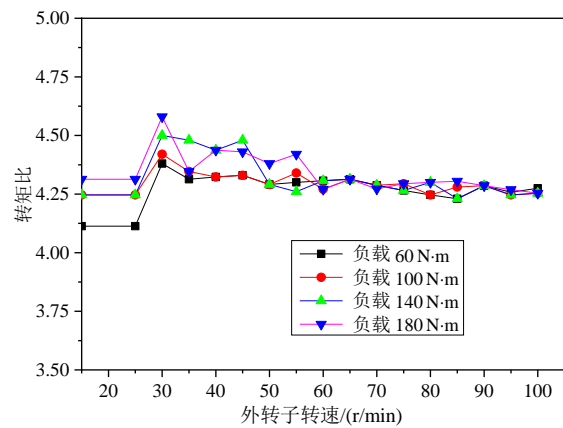


图 15 不同负载下的转矩比

Fig. 15 Torque ratio under different loads

图 16 为改进型磁齿轮的空载损耗曲线。可知，空载损耗随着输出转速的增加而增加。实验结果与

仿真结果存在一定误差,主要是因为仿真中未考虑机械摩擦损失和风摩擦损失。

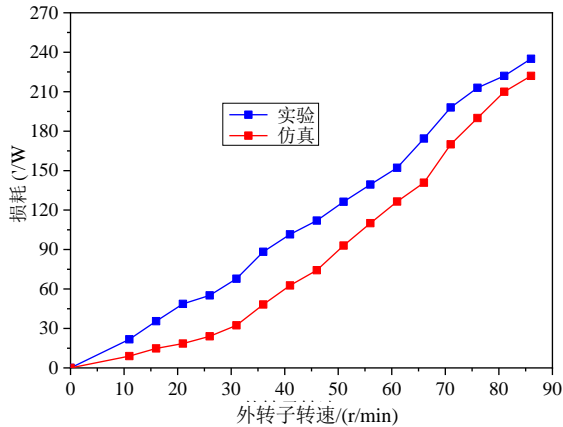


图 16 空载损耗

Fig. 16 No-load loss

图 17 为改进型磁齿轮的输出转速分别为 50 和 200 r/min 时的传递效率曲线。由图可知,磁齿轮在轻载下的传递效率较低,不适合在此模式下长期运行。同时,传输效率会随着转速的增加而降低,这也说明磁齿轮不适合高速场合。改进型磁齿轮的传递效率可达 90% 以上。

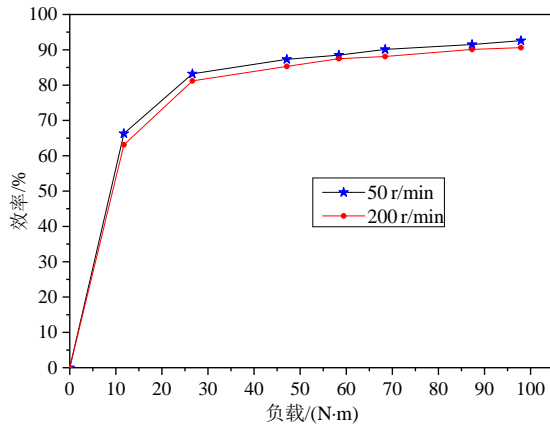


图 17 实测效率

Fig. 17 Measured efficiency

## 5 结论

本文提出了一种带 Spoke 和凸-T 型结构的同轴磁齿轮,该设计的内转子采用凸-T 交替排列的 Halbach 阵列结构,外转子则结合了 Spoke 与 Halbach 阵列结构。通过响应面法与遗传算法相结合的多目标优化方法,得到了最优结构参数。基于有限元计算和实验验证,主要结论如下:

1) 内外转子采用的 Halbach 阵列结构使得内外层气隙的磁密波形更加正弦化,非工作谐波得到有

效抑制。同时,外转子的 Spoke 结构有效聚焦了外气隙中的磁通密度,增强了工作谐波分量。

2) 与传统磁齿轮相比,改进型磁齿轮的输出转矩提高了 45.43%,内外转子转矩脉动分别降低了 63.96% 和 64.76%。同时,输出转矩相较于常规 Halbach 型磁齿轮也提升了 23.69%。

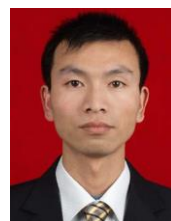
3) 基于多目标优化设计,在保证磁齿轮体积和永磁体用量相同的前提下,改进型磁齿轮的转矩密度可达到  $191.82 \text{ kN}\cdot\text{m}/\text{m}^3$ 。

4) 样机测试结果表明,改进型磁齿轮的转矩比与理论值一致,效率超过 90%。该设计在风力发电等低速直驱系统中具有广阔的应用前景。

## 参考文献

- [1] 刘逸凡, 许建中, 赵成勇, 等. 面向规模化海上风电场站实时仿真的精细化建模方法[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(19): 7648-7660.  
LIU Yifang, XU Jiangzhong, ZHAO Chengyong, et al. Refined modeling method for real-time simulation of large-scale offshore wind farm stations [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(19): 7648-7660(in Chinese).
- [2] ZHU Gaojia, LI Longnv, LIU Xiaoming, et al. Design optimization of a HTS-modulated PM wind generator[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2021, 31(8): 5204004.
- [3] 秦世耀, 齐琛, 李少林, 等. 电压源型构网风电机组研究现状及展望[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(4): 1314-1334.  
QIN Shiyao, QI Chen, LI Shaolin. Review of the voltage-source grid forming wind turbine [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(4): 1314-1334(in Chinese).
- [4] CHEN Zaiyu, YIN Minghui, ZOU Yun, et al. Maximum wind energy extraction for variable speed wind turbines with slow dynamic behavior[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(4): 3321-3322.
- [5] CHEN Peiyuan, THIRINGER T. Analysis of energy curtailment and capacity overinstallation to maximize wind turbine profit considering electricity price-wind correlation[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(4): 1406-1414.
- [6] 刘晓, 卢萌, 林娉婷, 等. 双磁场调制磁齿轮电机磁场调制机理研究[J]. 电机与控制学报, 2022, 26(10): 34-40.  
LIU Xiao, LU Meng, LIN Pingting, et al. Operation principle analysis of flux modulation in dual-flux-modulated magnetic gear machine[J]. Electric Machines and Control, 2022, 26(10): 34-40(in Chinese).
- [7] 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 Hailin, LI Dawei, QU Ronghai, et al. A review of magnetic geared machines: topologies and applications [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(6): 1381-1397(in Chinese).
- [8] ATALLAH K, HOWE D. A novel high-performance magnetic gear[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2001, 37(4): 2844-2846.
- [9] ZHANG Xiaozu, LIU Xiao, CHEN Zhe. A novel dual-flux-modulator coaxial magnetic gear for high torque capability[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2018, 33(2): 682-691.
- [10] WONG H Y, BANINAJAR H, DECHANT B W, et al. Experimentally testing a Halbach rotor coaxial magnetic gear with 279 Nm/L torque density[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2023, 38(1): 507-518.
- [11] JING Libing, HUANG Zhangxian, CHEN Junlin, et al. An asymmetric pole coaxial magnetic gear with unequal Halbach arrays and spoke structure[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2020, 30(4): 5200305.
- [12] JING Libing, ZHANG Ting, GAO Yuting, et al. A novel HTS modulated coaxial magnetic gear with eccentric structure and Halbach arrays[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2019, 29(5): 5000705.
- [13] RASMUSSEN P O, ANDERSEN T O, JORGENSEN F T, et al. Development of a high-performance magnetic gear[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005, 41(3): 764-770.
- [14] UPPALAPATI K K, CALVIN M D, WRIGHT J D, et al. A magnetic gearbox with an active region torque density of 239 N·m/L[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(2): 1331-1338.
- [15] 井立兵, 王涛, 潘永林, 等. 一种内转子不均匀 Halbach 阵列的磁性齿轮[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(S1): 366-373.
- JING Libing, WANG Tao, PAN Yonglin, et al. A magnetic gear with unequal Halbach arrays on the inner rotor[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(S1): 366-373(in Chinese).
- [16] ZHAO Yu, LI Dawei, REN Xiang, et al. Optimal pole ratio of Spoke-type permanent magnet Vernier machines for direct-drive applications[J]. CES Transactions on Electrical Machines and Systems, 2022, 6(4): 454-464.
- [17] BANINAJAR H, MODARESAHMADI S, WONG H Y, et al. A dual-stack coaxial magnetic gear for a wave energy conversion generator[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2022, 58(10): 8003012.
- [18] RIBEIRO R, ROMÃO E L, LUZ E, et al. Optimization of the resistance spot welding process of 22MnB5-galvannealed steel using response surface methodology and global criterion method based on principal components analysis[J]. Metals, 2020, 10(10): 1338.
- [19] LEE J I, SHIN K H, BANG T K, et al. Design and analysis of the coaxial magnetic gear considering the electromagnetic performance and mechanical stress[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2020, 30(4): 1-5.
- [20] LIU Xiao, ZHAO Yunyun, LU Meng, et al. Multi-objective optimization for a dual-flux-modulator coaxial magnetic gear with double-layer permanent magnet inner rotor[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2021, 57(7): 8001605.
- [21] PRASLICKA B, JOHNSON M, PLUGGE E, et al. Design and analysis of a novel, low-cost, high-speed cycloidal magnetic gear for aerospace servo actuator applications [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2023, 28(6): 3352-3363.
- [22] LEE S H, IM S Y, RYU J Y, et al. Optimum design process of coaxial magnetic gear using 3D performance prediction method considering axial flux leakage[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2024, 60(2): 3075-3085.
- [23] JING Libing, WANG Tao, TANG Weizhao, et al. Characteristic analysis of the magnetic variable speed diesel-electric hybrid motor with auxiliary teeth for ship propulsion[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2024, 29(1): 668-678.
- [24] JING Libing, LIU Wei, TANG Weizhao, et al. Design and optimization of coaxial magnetic gear with double-layer PMs and spoke structure for tidal power generation[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2023, 28(6): 3263-3271.
- [25] 王晨, 黄健, 江明, 等. 聚磁式永磁轮毂电机多目标优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(3): 1173-1184.
- WANG CHEN, HUANG Jian, JIANG Ming, et al. Multi-objective optimization and design of flux-concentrating permanent magnet in-wheel motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(3): 1173-1184 (in Chinese).
- [26] LI Xianglin, LIU Shengwei, WANG Qiusheng, et al. Performance investigation and experimental testing of a stator-PM-excitation axial-flux magnetic gear[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2023, 9(2): 2593-2605.



井立兵

在线出版日期: 2025-03-31。

收稿日期: 2024-11-25。

作者简介:

井立兵(1982), 男, 博士(后), 教授, 博士生导师, 研究方向为特种电机设计与磁力齿轮传动, jinglibing163@163.com。

(责任编辑 吕鲜艳)