

DOI: 10.13382/j.jemi.B1902783

# 新型永磁调磁式磁齿轮的设计与优化\*

黄金霖<sup>1</sup> 张国政<sup>1</sup> 周克良<sup>2</sup>

(1. 安徽机电职业技术学院 电气工程学院 芜湖 241000; 2. 江西理工大学 电气工程与自动化学院 赣州 341000)

**摘要:**为了提高磁齿轮的输出转矩和运行转速、减小永磁体的涡流损耗,提出一种新型永磁调磁式磁齿轮,分析其工作原理和转矩特性,结果表明相比较传统的磁齿轮,新型永磁调磁式磁齿轮具有传动效率高、转矩密度高、可高速传动的优点。在此基础上,为了获得新型磁齿轮的最优结构参数,以提升输出转矩和减小齿槽转矩为优化目标,提出一种基于参数敏感性和响应面法相结合的多目标优化方法,对新型磁齿轮的永磁调磁块、外转子及内转子永磁体等结构参数进行优化设计,利用有限元法分析优化前后新型磁齿轮的电磁性能,表明多目标优化方法可进一步提升新型磁齿轮的输出性能,为其应用和优化设计奠定了基础。

**关键词:** 磁齿轮; 永磁调磁; 齿槽转矩; 多目标优化。

**中图分类号:** TM352 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

## Design and optimization of a novel coaxial magnetic gear for stationary permanent magnet ring

Huang Jinlin<sup>1,2</sup> Zhang Guozheng<sup>1</sup> Zhou Keliang<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Anhui Technical College of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhu 241000, China;

2. School of Electrical Engineering and Automation, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

**Abstract:** In order to improve the output torque and speed, and reduce the permanent magnet (PM) eddy loss for magnetic gear, a novel magnetic gear with stationary PM ring is proposed. The operating principle and torque performance are analyzed, and the results showed that the novel magnetic gear has high efficiency, high torque density and high speed compared with traditional magnetic gear. Taking high output torque and low cogging torque as the optimization goals, a multi-objective optimization method based on the parameter sensitivity and response surface method is introduced, which aims to accurately obtain the magnetic gear structure parameters. Then, the PM ring, outer rotor and inner rotor are optimized. By analyzing the electromagnetic performances for novel magnetic gear between initial and optimal magnetic gear, the results show that the output torque is improved, and it lays a foundation for its application and optimization design.

**Keywords:** magnetic gear; PM ring; cogging torque; multi-objective optimization

## 0 引言

为了传递转速和转矩,机械齿轮箱在风力发电、重矿机械以及石油机械等低速大转矩场合得到了广泛的应用。然而在进行转矩传递的过程中,机械齿轮存在振动、

噪声和易损坏等问题,相比较机械齿轮,磁力齿轮通过磁场间的相互耦合来传递转矩,无需接触,不仅振动与噪声小,且具有过载自保护能力、加工制造简单及转矩密度高等优点,受到国内外诸多专家学者的关注<sup>[1-4]</sup>。

目前,国内外专家学者对磁齿轮的分析研究得到了相关的研究成果,文献[5]设计一种应用于人工心脏无

接触驱动装置中的永磁齿轮,分析和计算了永磁无接触驱动装置在不同工作状态下的涡流分布和阻尼转矩;文献[6]为了提高磁齿轮内外层气隙磁密正弦性,利用全局解析法对 Halbach 磁齿轮进行解析计算,并优化调磁块的宽度及高度,优化后的磁齿轮可得到更高的转矩密度;文献[7]研究了不同充磁方式对磁齿轮转矩和气隙磁密的影响,并利用二维和三维有限元法相结合的方法分析每极永磁体分块对磁场的影响;文献[8-9]为获取了磁齿轮在无调磁块情况下的气隙磁场解析模型,并将调磁块的调制作用等效为气隙磁导,根据标量磁位理论,进行转矩与气隙磁密的计算,表明所建立的模型更易于参数化优化计算;文献[10-15]将磁齿轮与永磁电机相结合,得到磁齿轮复合电机,利用有限分析法分析复合电机的电磁特性,研究表明,此类电机在低速大转矩应用领域有明显的优势,并将其应用于风力发电和混合动力系统中。

综上所述,近年来对磁齿轮的分析针对的均是传统结构的磁齿轮磁场计算与优化分析,如图 1 所示<sup>[3]</sup>。传统磁齿轮的外转子由外转子铁芯与永磁体构成,内转子铁芯与永磁体构成内转子,内外转子之间放置调磁块,仅仅适用于中低速场合。所做的分析也仅仅限于解析计算、有限元稳态转矩分析及复合电机的电磁特性分析,对其拓扑结构的创新很少涉及。随着材料及工艺水平的提高,对驱动电机的功率密度需求越来越高,而高速电机是提升电机功率密度的有效途径之一,使得传统的磁齿轮已经不能满足某些传动场合的需求。因此,提升磁齿轮的转速是当前亟需解决的关键问题之一,目前限制磁齿轮转速提升的主要原因有两个方面。1) 内外转子均采用表贴式结构,永磁体的结构强度受到一定的限制;2) 随着转速的提升,永磁体的涡流损耗较大,影响磁齿轮的寿命。

为了解决当前磁齿轮高速化带来的问题,本文在分析传统磁齿轮转矩特性的基础上,结合游标电机的工作原理,创新地将传统磁齿轮的调磁块变成永磁调磁块,并引入磁阻电机的相关概念,提出新型拓扑结构的永磁调磁式磁齿轮,同时将永磁体内置,大幅度提升磁齿轮的工作转速,分析其工作原理,利用有限元分析新型永磁调磁式磁齿轮的基本特性,在此基础上,利用响应面法对调磁块和内外转子进行优化分析,为其在风力发电及电动汽车领域的应用奠定基础。

## 1 新型磁齿轮的拓扑结构

传统的磁齿轮主要应用于低速领域,且内外转子上均存在永磁体,由于利用磁场调制的原理工作,气隙磁场中的谐波含量较大,导致稳定运行时转子永磁体的涡流

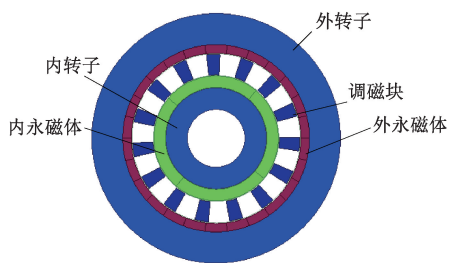


图 1 传统磁齿轮结构

Fig. 1 Configuration of traditional magnetic gear

损耗较大,一定程度上影响运行的可靠性,为了提高磁齿轮内外转子运行的稳定性及可靠性,节省永磁体的用量,提高磁齿轮的运行速度,本文结合永磁游标电机与凸极电机的优点,提出新型结构的永磁调磁式磁齿轮,其结构如图 2 所示。

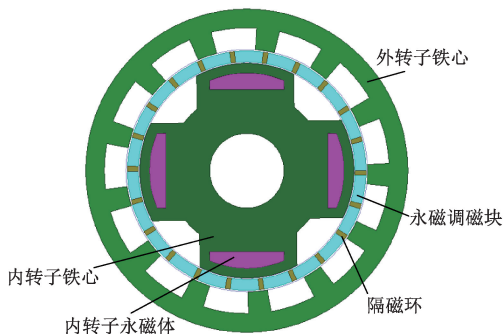


图 2 永磁调磁块磁齿轮

Fig. 2 Magnetic gear for stationary PPM ring

由图 2 可知,与传统磁齿轮不同的地方在于将外转子永磁体置于中间的调磁块位置,每极的永磁调磁块用不锈钢隔磁环隔开,减小漏磁和永磁体用量,外转子铁心变成类似磁阻电机的结构,进行磁场调制;同时,将内转子的表贴式磁钢进行内置,减小了高速后永磁体失效的风险,永磁表面采用弧形的结构,减小了与内转子铁心隔磁桥的漏磁。本文所提出的永磁调磁块式磁齿轮大部分永磁体位于调磁块位置,不旋转,不产生涡流损耗,传动效率较高;内转子永磁体采用内置式结构,可高速旋转。

### 1.1 工作原理

与传统的磁齿轮工作原理相比,永磁调磁块式磁齿轮的工作原理有一定的区别,永磁调磁块式磁齿轮的工作原理如图 3 所示。

由于外转子为凸极结构,内转子永磁体产生的磁场经过调磁块后,利用磁阻转矩带动外转子旋转。对于永磁调磁块式磁齿轮,其外转子不存在永磁体,但永磁调磁块会产生磁场,则其永磁调磁块在内外气隙产生的磁动势为:

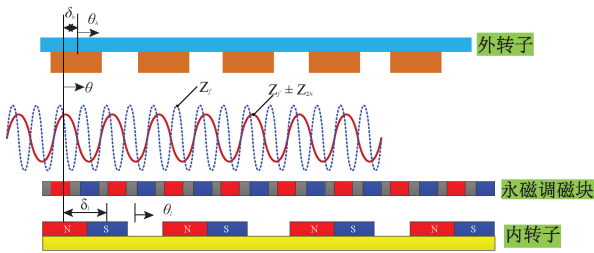


图3 新型磁齿轮的工作原理

Fig. 3 Principle of novel magnetic gear

$$F_f = F_{fm} \cos(Z_f \theta) \quad (1)$$

式中:  $F_f$  为永磁调磁块产生的磁动势;  $F_{fm}$  为永磁调磁块磁动势的幅值;  $Z_f$  为永磁调磁块的极对数;  $F_{im}$ 、 $F_{om}$  分别为内外层气隙磁动势的幅值;  $\theta_i$ 、 $\theta_o$  分别为内外转子的机械角度。

中间永磁调磁块的磁导及内转子磁导的计算公式分别为:

$$\Lambda_s = \Lambda_{s0} + \Lambda_{sm} \cos(Z_s \theta) \quad (2)$$

$$\Lambda_i = \Lambda_{i0} + \Lambda_{im} \cos(Z_{2i} \theta_i - Z_{2i} \omega_i t) =$$

$$\Lambda_{i0} + \Lambda_{im} \cos(Z_{2i} \theta_i - Z_{2i} \omega_i t - Z_{2i} \delta_i) \quad (3)$$

根据磁路的欧姆定律,则气隙的磁通密度分布函数为:

$$\Phi(\theta, t) = F_f \Lambda_s \Lambda_i =$$

$$F_{fm} \Lambda_{s0} \Lambda_{i0} \cos(Z_f \theta) +$$

$$\frac{1}{2} F_{fm} \Lambda_{s0} \Lambda_{sm} [\cos\{(Z_f + Z_i)\theta\} + \cos\{(Z_s - Z_f)\theta\}] +$$

$$\frac{1}{2} F_{fm} \Lambda_{s0} \Lambda_{im} [\cos\{(Z_f + Z_{2i})\theta - Z_{2i} \omega_i t - Z_{2i} \delta_i\} +$$

$$\cos\{(Z_f - Z_{2i})\theta + Z_{2i} \omega_i t + Z_{2i} \delta_i\}] +$$

$$\frac{1}{4} F_{fm} \Lambda_{sm} \Lambda_{im} [\cos\{(Z_f + Z_s + Z_{2i})\theta - Z_{2i} \omega_i t - Z_{2i} \delta_i\} +$$

$$\cos\{(Z_f - Z_s - Z_{2i})\theta + Z_{2i} \omega_i t + Z_{2i} \delta_i\} +$$

$$\cos\{(Z_f + Z_s + Z_{2i})\theta - Z_{2i} \omega_i t - Z_{2i} \delta_i\} +$$

$$\cos\{(Z_f - Z_s + Z_{2i})\theta - Z_{2i} \omega_i t - Z_{2i} \delta_i\}] \quad (4)$$

由式(4)可知,对于永磁调磁块磁齿轮,第7次谐波与第9次谐波提供磁耦合,故磁齿轮内外转子的磁极对数应满足下列的等式:

$$Z_o = Z_f \pm Z_{2i} \quad (5)$$

即新型磁齿轮的永磁调磁块个数等于外转子齿数与内转子极数之差或之和。

根据永磁电机的基本理论,新型磁齿轮产生的电磁转矩为:

$$T = \frac{\partial W_m}{\partial \theta} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \varphi \times \frac{\partial F}{\partial \theta} d\theta \quad (6)$$

式中:  $T$  为传递转矩的平均值;  $F$  为永磁体产生的磁动势;  $W_m$  为磁场能量。

当内外转子的极对数满足一定的传动比时<sup>[4]</sup>,联合上述解析表达式,得到内转子和外转子的传递转矩分别为:

$$T_{in} = \frac{1}{4} F_{om} F_{fm} \Lambda_{s0} \Lambda_{sm} Z_i \sin[-(Z_i \omega_i \mp Z_{2i} \omega_i) t - Z_o \delta_o \pm Z_{2i} \delta_i] \quad (7)$$

$$T_{in} = \frac{1}{4} F_{om} F_{fm} \Lambda_{s0} \Lambda_{im} Z_o \sin[-(Z_o \omega_o \mp Z_{2i} \omega_i) t - Z_o \delta_o \pm Z_{2i} \delta_i] \quad (8)$$

### 1.2 基本特性分析

建立新型永磁调磁块式磁齿轮有限元分析模型,主要尺寸参数如表1所示,得到其空载条件下,二者的磁力线及磁云密度分布图,如图4所示。由图4可知,外磁阻式磁齿轮的外转子磁力线为26极分布,内转子为4极分布,与前面的分析结果相一致;内磁阻式磁齿轮的外转子磁力线也为26极分布,内转子为4极分布,与前面的分析结果一致。

表1 新型磁齿轮主要尺寸参数

Table 1 Novel magnetic gear main parameter

参数	数值	参数	数值
外转子齿数	26	内转子极数	4
永磁调磁块数	22	隔磁环数	22
外转子外径/mm	100	内转子外径/mm	65
气隙长度/mm	1	内转子内径/mm	20

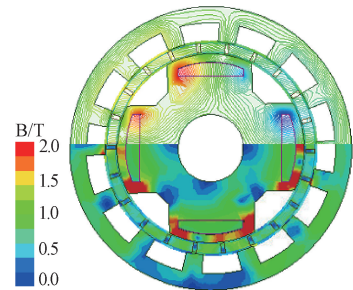


图4 新型磁齿轮的磁密云图

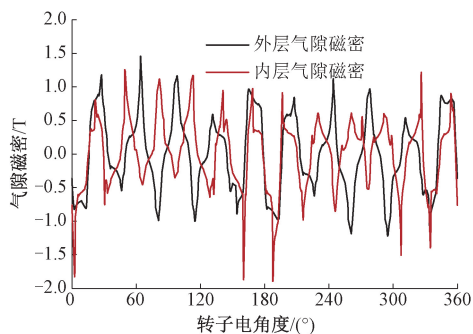
Fig. 4 Flux density distribution of novel magnetic gear

#### 1) 气隙磁密

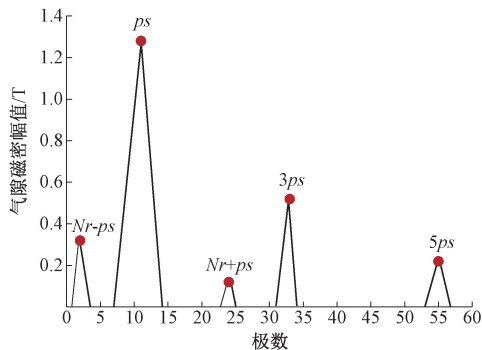
对新型磁齿轮的气隙磁场进行计算分析,得到型磁齿轮的内外层气隙磁密波形与外层气隙磁密的谐波分析如图5所示。由图5可知,气隙磁密谐波含量较多,呈不均匀分布。永磁调磁块的存在有效的增加了气隙磁密幅值,径向最大气隙磁密可达1.4 T。较高的气隙磁密有助于进一步提升磁齿轮的转矩输出性能。

#### 2) 矩角特性

磁齿轮的矩角特性代表了磁齿轮的转矩传递能力,是评价磁齿轮性能的首要指标。保持新型磁齿轮的外转



(a) Inner air-gap flux waveforms



(b) Outer air-gap flux waveforms

图 5 新型磁齿轮内层气隙磁密分布  
Fig. 5 The inner air-gap flux density for novel magnetic gear

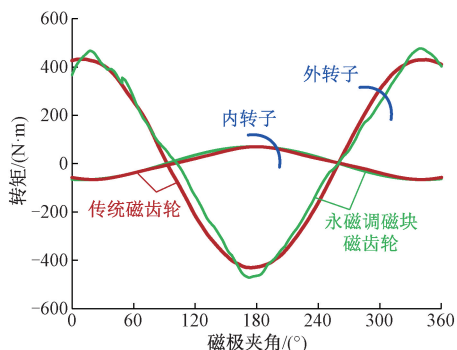


图 6 稳态转矩曲线

Fig. 6 The output torque waveform

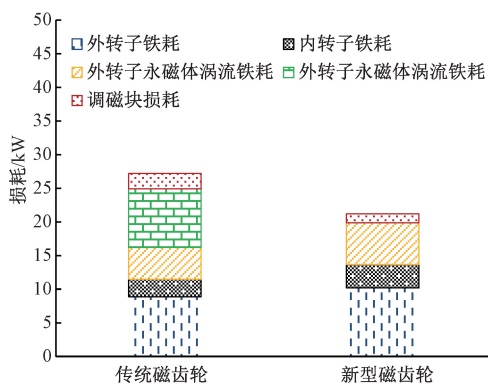


图 7 磁齿轮的损耗分布

Fig. 7 The loss of two different magnetic gear

子固定不动,内转子从初始位置开始,每转动  $3^\circ$  求解一次外转子的输出静转矩,直至外转子的转角为  $90^\circ$  为止,得到稳态转矩特性曲线如图 6 所示。由图 6 可知,在相同的体积条件下,新型磁齿轮的转矩特性与传统磁齿轮基本未发生较大的变化,且新型磁齿轮的最大比传统磁齿轮更大,但永磁体的用量较传统磁齿轮更小,其转矩密度更大。新型磁齿轮的外转子最大转矩大约为  $430 \text{ N}\cdot\text{m}$ ,内转子最大转矩大约为  $74 \text{ N}\cdot\text{m}$ ,其外转子转矩和内转子转矩的传动比大约为 6,与前述的分析一致,证实了理论分析方法的正确性。

### 3) 损耗与效率

损耗和传动效率也是磁齿轮比较关注的指标,相比较传统的机械齿轮,磁齿轮具有更高的效率。其损耗主要包含永磁体涡流损耗、内外转子铁损耗以及调磁块的损耗,传统磁齿轮和本文提出的新型磁齿轮的损耗分布情况如图 7 所示。

由图 7 可知,由于外转子采用磁阻结构,谐波含量较高,新型磁齿轮的外转子铁心损耗明显高于传统磁齿轮的外转子铁心损耗,且由于内转子磁钢采用内置式结构,其饱和现象明显,导致其内转子铁心的损耗也大于传统磁齿轮;但由于采用了永磁调磁块,不存在外转子永磁体

损耗。因此,新型磁齿轮的总损耗小于传统磁齿轮,其传动效率更高。不同输出功率下的两种磁齿轮的传动效率变化曲线如图 8 所示。

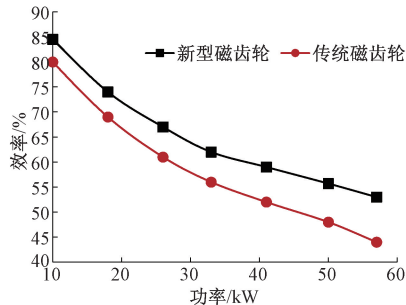


图 8 效率变化曲线

Fig. 8 Efficiency versus output power

由图 8 可知,随着功率的上升,磁齿轮的传动效率均呈明显下降的趋势,但新型磁齿轮的传动效率明显高于传统磁齿轮的传动效率,且随着功率的上升,优势更加明显。这是由于随着功率的上升,磁齿轮的转速逐渐升高,而损耗呈平方倍增大的趋势。

## 2 新型磁齿轮的优化分析

对结构参数的优化分析是为了获得最优的性能参数,文献[16-19]分别采用了粒子群算法、遗传算法以及极限学习机算法对相关电机参数进行优化分析,获得了较理想的结果。对于本文所提出的新型磁齿轮,各参数直接对输出性能的影响较大,为了获取新型磁齿轮的最优参数值,降低多个结构参数同时优化相互间的干扰,采用参数敏感性分析和响应面法相结合,对新型磁齿轮的结构参数进行多目标优化设计,其流程如图9所示。由图可知,其优化流程主要分如下4个部分:1)确定优化目标、结构参数边界条件及优化模型方程;2)对各优化目标进行参数敏感度分析计算;3)利用响应面寻求最优的参数;4)利用有限元分析法对比优化前后的磁齿轮性能。

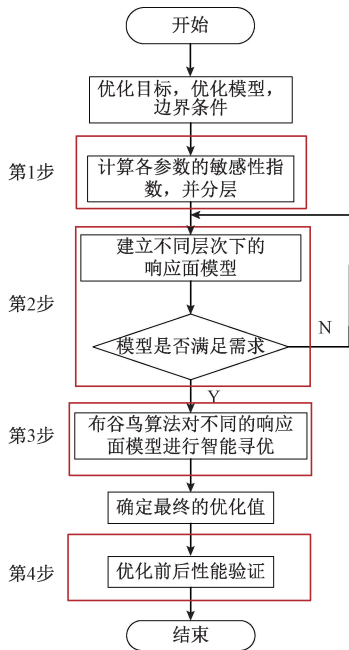


图9 优化流程

Fig. 9 Optimization flowchart

### 2.1 优化目标及边界条件的确定

本文提出的磁齿轮为磁阻式结构,其脉动转矩较大,因此,本文主要以提高输出转矩和减小齿槽转矩为优化目标。输出转矩指外转子的输出转矩,依据磁齿轮的工作原理,其内转子的输出转矩与外转子呈一定的比例;齿槽转矩指由于永磁体在气隙中产生的能量对两个转子产生的转矩,由于外转子采用凸极结构,本文也以外转子产生的齿槽转矩为评价原则。因此,优化模型方程为各优化目标的加权和,可表示为:

$$f_{\min}(x_i) = \lambda_1 \frac{T_{out1}}{T_{out2}} + \lambda_2 \frac{T_{cog1}}{T_{cog2}} \quad (9)$$

$$\lambda_1 + \lambda_2 = 1 \quad (10)$$

式中: $T_{out1}$ 、 $T_{cog1}$ 为优化前的外转子输出转矩和齿槽转矩; $T_{out2}$ 、 $T_{cog2}$ 为优化后的外转子输出转矩和齿槽转矩; $x_i$ 为结构参数变量, $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 为权重系数,其大小代表优化过程中的重要性。

在多目标优化的过程中,需要选择合适的对象,对于本文提出的新型磁齿轮,其主要优化的目标为永磁调磁块的极弧系数 $\alpha_1$ ,永磁调磁块的厚度 $h_1$ ,外转子的齿宽 $W$ 以及外转子的轭部厚度 $H$ ,内转子永磁体的极弧系数 $\alpha_2$ ,内转子永磁体厚度 $h_2$ ,内转子永磁体的深度 $h_3$ ,如图10所示。

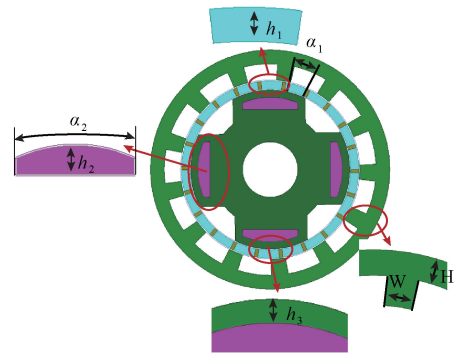


图10 优化参数模型

Fig. 10 Optimization parameters model

### 2.2 参数敏感性分析

参数敏感性分析可以确定结构参数对优化目标的影响程度,其绝对值的大小代表其影响的程度;正负代表对优化目标起到促进或抑制作用。为了进一步考虑不同结构参数之间的耦合影响,本文采用综合敏感性分析指数来体现结构参数对优化目标的影响程度,其方程为:

$$F(x_i) = \lambda_1 |G(x_i)| + \lambda_2 |H(x_i)| \quad (11)$$

式中: $G(x_i)$ 和 $H(x_i)$ 分别表示结构参数对输出转矩和齿槽转矩的敏感性。

基于以上分析理论,对本文所提出的新型磁齿轮结构参数进行敏感性分析,得到的结构如表2所示。

表2 结构参数对优化目标的敏感性分析结果

Table 2 Sensitivity analysis results

参数	$G(x_i)$	$H(x_i)$	$F(x_i)$
$\alpha_1$	3.76	-1.44	2.38
$h_1$	3.42	-1.27	2.345
$W$	-0.37	0.024	0.394
$H$	1.04	0.016	0.528
$\alpha_2$	1.76	-1.02	1.39
$h_2$	1.24	-0.78	2.02
$h_3$	1.14	-1.05	1.665

基于敏感性的分析结果,可将参数分为 3 层,敏感性参数较大为第 1 层,敏感性参数较小的为第 3 层。(第 1 层: $F(x_i) \geq 2.0$ ;第 2 层: $2.0 \geq F(x_i) \geq 1.0$ ;第 3 层: $F(x_i) \leq 1.0$ )采用参数分层设计,可以有效的降低响应面的维数,在第 1、2 层参数采集 15 个样本点,在第 3 层参数只需分析 9 次,共只需采集 39 次采样,极大的提高了优化的效率。

### 2.3 响应面法优化

利用响应面法对磁齿轮进行优化分析,无需明确各结构参数与优化目标之间的关系表达式,只需要拟合一个与实际模型非常接近的曲面方程,建立相应的响应面模型即可<sup>[20-21]</sup>。响应面模型中样本点的采集主要有复合试验设计(CCD)和 Box-Behnken 试验设计(BBD)两种方法,而 CCD 方法选取的采样点会出现超过磁齿轮结构参数范围的情况,故本文采用 BBD 的方法对磁齿轮响应面模型进行样本点采集,得到输出转矩和齿槽转矩与设计参数之间的关系可表示为:

$$f(x_1, x_2, x_3) = \beta_0 + \sum_{i=1}^3 \beta_i x_i + \sum_{i=1}^3 \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=i+1}^3 x_i x_j + \varepsilon \quad (12)$$

将第 1 层次的永磁调磁块的极弧系数  $\alpha_1$ ,永磁调磁块的厚度  $h_1$  和内转子永磁体厚度  $h_2$  为结构参数,得到第 1 层次各参数与输出转矩和齿槽转矩的关系如图 11 和 12 所示。

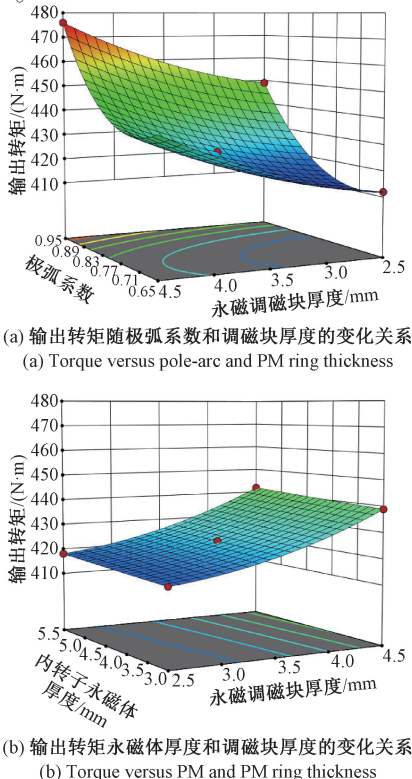
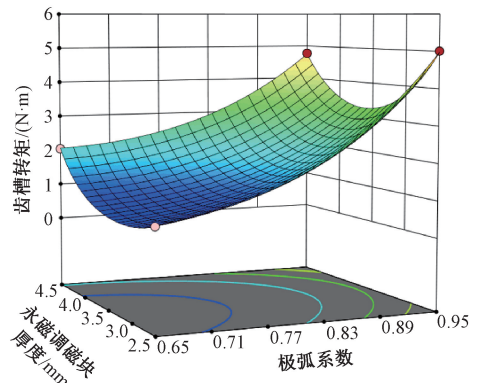
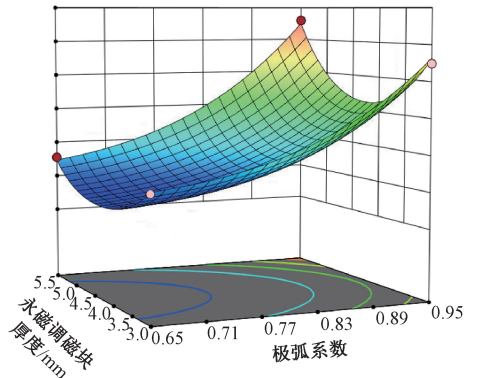


图 11 不同结构参数下输出转矩响应

Fig. 11 Output torque response under different structural parameters



(a) 齿槽转矩随极弧系数和调磁块厚度的变化关系  
(a) Cogging torque versus pole-arc and PM ring thickness



(b) 齿槽转矩永磁体厚度和调磁块厚度的变化关系  
(b) Cogging torque versus PM and PM ring thickness

图 12 不同结构参数下齿槽转矩响应  
Fig. 12 Cogging torque response under different structural parameters

由图 11(a) 可知,在保持内转子永磁体厚度不变时,永磁调磁块的极弧系数和厚度的交互作用都较显著。相比永磁体厚度,极弧系数的增加,响应曲面变化的幅度更大,说明比永磁体厚度对响应面的影响强度大。随着极弧系数的增加,永磁调磁齿轮的输出转矩呈先减小后增大的趋势;而随着永磁体的厚度增大,磁齿轮的输出转矩明显增加。由图 11(b) 可知,内转子永磁体厚度与永磁调磁块的基本不产生交互作用,随着两者厚度的增加,输出转矩均呈上升的趋势,但调磁块厚度对输出转矩的影响更大。

由图 12(a) 可知,在保持内转子永磁体厚度不变时,永磁调磁块的极弧系数和厚度的交互作用都较显著。相比永磁体厚度,极弧系数的增加,响应曲面变化的幅度更大,说明比永磁体厚度对响应面的影响强度大。随着极弧系数的增加,永磁调磁齿轮的齿槽转矩呈明显增大的趋势。由图 12(b) 可知,随着内转子永磁体厚度的增加,齿槽转矩呈先减小后增大的趋势。

得到合适的响应面模型后,对于敏感性较大的参数,

选用布谷鸟算法进行智能寻优,确定敏感性较大的最终优化值,如表 3 所示。优化后,永磁调磁块的极弧系数选取为 0.86,永磁调磁块和内转子永磁体厚度分别选为 4.2 和 3.8 mm。优化后的输出转矩从 430 N·m 提升至 475 N·m,齿槽转矩从 3.6 N·m 降低为 2.76 N·m。

同理,可得到第 2 层次和第 3 层次下各结构参数的最终优化参数,如表 4 所示。

### 2.4 优化前后的性能对比

为了进一步验证所提出优化方法的可靠性与有效性,分别建立优化前后的有限元分析模型,利用有限元分析的方法分析了优化前后新型永磁调磁式磁齿轮的电磁性能。

表 3 新型磁齿轮优化前后结构

参数	优化前	优化后	优化后有限元验证
$\alpha_1$	0.8	0.86	0.86
$h_1/\text{mm}$	3.5	4.2	4.2
$h_2/\text{mm}$	4	3.8	3.8
输出转矩/(N·m)	430	475	479
齿槽转矩/(N·m)	3.68	2.76	2.83

表 4 新型磁齿轮优化前后参数

参数	数值	
	优化前	优化后
$\alpha_1$	0.8	0.86
$h_1/\text{mm}$	3.5	4.2
$W$	6.5	7.25
$H$	6	5.85
$\alpha_2$	0.82	0.88
$h_2/\text{mm}$	4	3.8
$h_3/\text{mm}$	2	1.75

优化前后新型磁齿轮的矩角特性变化曲线如图 13 所示,由图 13 可知,优化后新型磁齿轮的稳态转矩由 420 N·m 增加至 475 N·m;优化前后齿槽转矩的变化曲线如图 14 所示,可以看出,优化后齿槽转矩减小至 2.04 N·m,降低了 2.13 倍。而优化前后效率变化曲线如图 15 所示,可

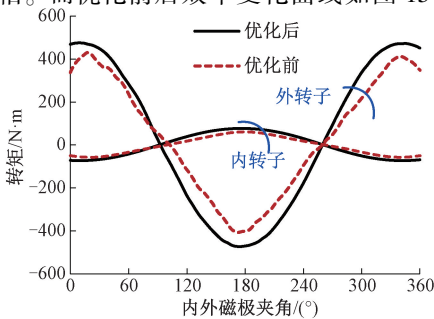


图 13 优化前后转矩特性

Fig. 13 Optimized torque characteristics

以看出,优化后新型磁齿轮的效率得到一定的提升,这是由于在相同的体积前提下,电机的输出转矩得到一定的提升,且谐波含量更少。

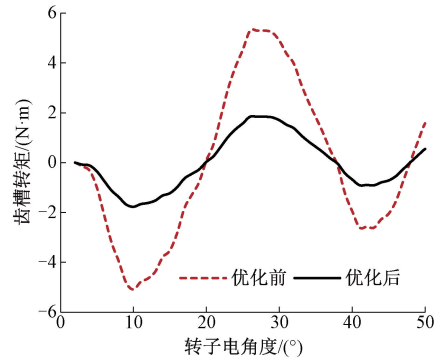


图 14 优化前后齿槽转矩

Fig. 14 Optimized cogging torque

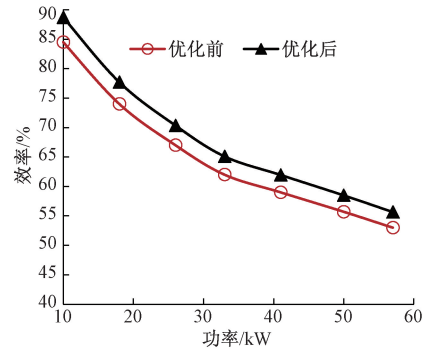


图 15 优化前后效率特性

Fig. 15 Optimized efficiency characteristics

## 3 结论

本文提出一种外转子磁阻式新型磁齿轮,对比分析了该结构与传统的磁齿轮相比具有转速高、传动效率高及输出转矩大等优势。在此基础上,以降低齿槽转矩和提升输出转矩为优化目标,采用参数敏感分析与响应面相结合的方法,可以快速、高效、准确地获取优化参数。利用有限元法,仿真对比分析了优化前后电机的性能,验证证明优化后的新型磁齿轮具有更优越的转矩输出性能和更高的传动效率,验证了所提出的基于多目标优化方法的正确性和合理性,更进一步验证了新型磁齿轮具有良好的传动性能,为其在新能源和风力发电领域的应用奠定了一定的基础。

### 参考文献

[ 1 ] 包广清,刘新华,毛开富. 基于磁场调制式磁齿轮传动的永磁同步风力发电系统[J]. 农业机械学报, 2011,

- 42 (5):116-120.
- BAO G Q, LIU X H, MAO K F. Characteristics of field modulated magnetic gear in wind turbine system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42 (5):116-120.
- [ 2 ] 肖磊, 张海, 许宝玉. Halbach 永磁阵列型轴向调制永磁齿轮 [J]. 机械科学与技术, 2019, 38 (9): 1373-1379.
- XIAO L, ZHANG H, XU B Y. An axial modulating permanent magnetic gear using halbach magnet arrays [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2019, 38(9):1373-1379.
- [ 3 ] ATALLAH K., CALVERLEY S, DUGGAN S. Design and operation of a magnetic continuously variable transmission [J]. IEEE Transactions on Industry Application, 2012, 48(4): 1288-1295.
- [ 4 ] JING L B, GONG J, HUANG ZH X, et al. A new structure for magnetic gear [J]. IEEE Access, 2019, 48(7): 75550-75555.
- [ 5 ] 夏东. 永磁齿轮的阻尼系统及其在人工心脏无接触驱动装置中的应用 [J]. 电工技术学报, 2013, 28(2):91-96.
- XIA D. Permanent magnet gear damping system and its application in the Non-contact driving device for artificial heart [J]. Transactions of China electrotechnical society, 2013, 28(2):91-96.
- [ 6 ] 井立兵, 柳霖, 章跃进, 等. Halbach 阵列同心式磁力齿轮参数分析与优化设计 [J]. 电机与控制学报, 2016, 20(3):6-12.
- JING L B, LIU L, ZHANG Y J, et al. Parameters analysis and optimization design for concentric magnetic gear with Halbach permanent-magnet arrays [J]. Electric Machines and Control, 2016, 20 (3): 6-12. (in Chinese)
- [ 7 ] 刘细平, 易靓, 刁艳美, 等. 磁齿轮传动永磁同步风力发电机分析 [J]. 微特电机, 2013, 41(7):34-37.
- LIU X P, YI L, DIAO Y M, et al. Analysis of a magnetic geared transmission permanent magnet synchronous wind generator [J]. Small and Special Electrical Machines, 2013, 41(7):34-37.
- [ 8 ] SHIN H M, CHANG J H. Analytical magnetic field calculation of coaxial magnetic gear with flux concentrating rotor [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2016, 52(7):1-4.
- [ 9 ] 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.
- JING L B, ZHANG Y J, LI C, et al. Magnetic field computation and optimization design for a concentric magnetic gear with Halbach permanent-magnet Arrays [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(21):163-169.
- [ 10 ] 杜世勤. 新型磁齿轮复合电机的设计研究 [D]. 上海: 上海大学, 2010.
- DU SH Q. Research and design on a permanent magnet electrical machine combined with a magnetic gear [D]. Shanghai: Shanghai University, 2010.
- [ 11 ] 王凤翔. 永磁电机在风力发电系统中的应用及其发展趋势 [J]. 电工技术学报, 2012, 27(3): 12-24.
- WANG F X. Application and development tendency of PM machines in wind power generation system [J]. Transactions of China electro-Technical Society, 2012, 27(3): 12-24.
- [ 12 ] LEI G, LIU C C, ZHU J G, et al. Techniques for multilevel design optimization of permanent magnet motors [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2015, 30(4): 1574-1584.
- [ 13 ] XIE K F, LI D W, QU R H, et al. A novel permanent magnet vernier machine with halbach array magnets in stator slot opening [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2017, 53(6): 1-5.
- [ 14 ] LIU C H, YU J C, LEE C. A new electric magnetic-gear machine for electric unmanned aerial vehicles [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2017, 53(11): 1-6.
- [ 15 ] XING Z, NIU S X. Design and optimization of a new magnetic-gear pole-changing hybrid excitation machine [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(12): 9943-9952.
- [ 16 ] 刘勇智, 李杰, 鄱成龙, 等. 基于 KELM-SAPSO 的开关磁阻电机优化设计 [J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(2):148-153.
- LIU Y Z, LI J, SHAN C L, et al. Optimization design of switched reluctance motor based on kernel extreme learning machine and simulated annealing particle swarm optimization [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(2):148-153.
- [ 17 ] SONG J C, DONG F, ZHAO J W. A new design optimization method for permanent magnet synchronous linear motors [J]. Energies, 2016, 9(12):992-1002.
- [ 18 ] 高洁. 基于粒子群算法的 SR 电机转矩脉动全局优化研究 [D]. 天津: 河北工业大学, 2012.
- GAO J. The global optimization of torque ripple for SR motor based on the particle swarm algorithm [D]. Tianjin: Hebei University of technology, 2012.
- [ 19 ] 饶盛华, 张小平, 张铸, 等. 基于果蝇算法的开关磁阻



电机多目标优化研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2017,31(7): 1152-1156.

RAO SH H, ZHANG X P, ZHANG ZH, et al. Study on multi-objective optimization of SRM based on FOA[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017,31(7): 1152-1156.

- [20] 李争, 张璐, 王群京, 等. 基于响应面法的永磁转子偏转式三自由度电动机结构参数的优化设计[J]. 电工技术学报, 2015,30(13): 134-142.

LI ZH, ZHANG L, WANG Q J, et al. Optimal design of structure parameters of three-DOF deflection type PM motor based on response surface methodology [J]. Transactions of China Electro technical Society, 2015, 30(13): 134-142.

- [21] 王晨, 黄金霖. 基于响应面法的定子永磁型轴向磁通切换电机齿槽转矩优化设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2017,31(7): 1144-1151.

WANG CH, HUANG J L. Optimization design of cogging torque in stator permanent magnet type axial flux switching motor based on response surface method [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017,31(7): 1144-1151.

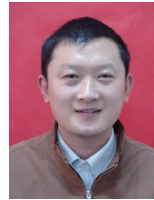
## 作者简介



**黄金霖**, 2010年于江西理工大学获得学士学位, 2013年于江西理工大学获得硕士学位, 现为安徽机电职业技术学院讲师, 主要研究方向为新型永磁电机及其设计。

E-mail: 0125000562@ahcme.edu.cn

**Huang Jinlin** received B. Sc. and M. Sc. from Jiangxi University of Science and Technology in 2010 and 2013, respectively. Now she is a lecturer in Anhui Technical College of Mechanical and Electrical Engineering. Her main research interests include design and analysis of new permanent magnet motor.



**张国政**(通信作者), 2019年于合肥工业大学获得博士学位, 现为安徽机电职业技术学院教授, 主要研究方向为新型齿轮设计和齿轮制造技术。

E-mail: 0124000071@ahcme.edu.cn

**Zhang Guozheng** received Ph. D. degree from Hefei University of Technology in 2019. Now he is a professor in Anhui Technical College of Mechanical and Electrical Engineering. His main research interests include design of novel gear and manufacturing technology.