

# 航空用大型磁场调制式齿轮设计与性能分析

陈亚千<sup>1</sup>, 韩劲<sup>2\*</sup>, 赵曙光<sup>2</sup>, 陈梦浩<sup>2</sup>, 覃秋霞<sup>3</sup>, 欧阳瑞斌<sup>3</sup>

(1. 沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870;

2. 中国航发北京航空材料研究院, 北京 100095;

3. 中国航发湖南动力机械研究所, 湖南 株洲 412002)

## Design and Performance Analysis of Large Magnetic Field Modulation Gears for Aviation Applications

CHEN Yaqian<sup>1</sup>, HAN Jin<sup>2\*</sup>, ZHAO Shuguang<sup>2</sup>, CHEN Menghao<sup>2</sup>,  
TAN Qiuxia<sup>3</sup>, OUYANG Ruibin<sup>3</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;

2. AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China;

3. AECC Hu'nan Aviation Powerplant Research Institute, Zhuzhou 412002, China)

**Abstract:** [Objective] In response to the high requirements including torque density, operating efficiency, and reliability for large transmission components used in aviation, as well as the mechanical gears have problems including easy wear, lack of overload protection, and high maintenance costs. Therefore, a large magnetic field modulation gear is designed in this paper. [Methods] Through analysis for the structural characteristics and design requirements of large magnetic field modulation gears which used in aviation, torque transmission density would be increased as much as possible while considering performance such as efficiency and torque fluctuation. A nonlinear constrained genetic algorithm was used for multi-objective optimization design. Based on the optimized electromagnetic design scheme, finite element method was used to analyze the electromagnetic characteristics, stress distribution characteristics for key components, and temperature rise during operation. [Results] According to the results of multi-physics field analysis, the output power of the proposed magnetic field modulation gear had been reached 500 kW. It could operate smoothly with an efficiency reached 96.17%. The laminated magnetic adjustment block and permanent magnet laminations could effectively reduce core-loss. During its stable operation, the stress of key components inside the rotor could

meet the strength requirements by using carbon fiber as the rotor binding sheath, and the temperature of each component had not exceed the allowable material temperature.

[Conclusion] The analysis results have verified the rationality and feasibility for the design, which providing a theoretical basis for the design and application of large aviation magnetic field modulation gears, and having certain engineering reference value.

**Key words:** magnetic field modulation gear; nonlinear constrained genetic algorithm; multi-objective optimization; multi-physics field analysis

**摘要:** [目的] 针对航空用大型传动部件对其转矩密度、运行效率和可靠性有较高的要求,以及传统机械齿轮存在易磨损、无过载保护及维护成本高等问题,本文设计了一种大型磁场调制式齿轮。[方法] 通过对航空用大型磁场调制式齿轮的结构特点与设计指标要求进行深入剖析,尽可能增加转矩传递密度,同时兼顾工作效率、转矩波动等性能。采用非线性约束遗传算法进行多目标优化设计。基于优化后的电磁设计方案,利用有限元法分析其电磁特性、关键部件的应力分布特性以及运行时的温升情况。[结果] 多物理场分析结果表明,本文设计的磁场调制式齿轮输出功率可达 500 kW 且运行平稳,效率达 96.17%,叠压制成的调磁块以及永磁体叠片可以有效降低铁耗。在稳定运行状态下,采用碳纤维作为转子绑扎套的关键部件应力满足强度要求,各部件温度均未超过材料许用温度。[结论] 分析结果验证了该设计的合理性与可行性,为航空用大型磁场调制式齿轮的设计和应用

基金项目: 辽宁省教育厅基本科研项目(青年项目)  
(LJKQZ20222331)

Basic Research Project of Liaoning Provincial Department of Education (Youth Project) (LJKQZ20222331)

提供了理论依据,具有一定的工程参考价值。

**关键词:** 磁场调制式齿轮;非线性约束遗传算法;多目标优化;多物理场分析

## 0 引言

齿轮传动最初通过主动轮带动从动轮实现传动,传统机械齿轮因需接触传动,存在成本高、易磨损、需定期维护及无过载保护等问题<sup>[1-3]</sup>。相比之下,磁场调制式齿轮具有非接触传动、噪声小、自带过载保护、无需润滑和维护等优势,且运行更平稳<sup>[4-7]</sup>。因此,该结构成为一种具备高转矩密度和可靠性的传动装置,在风电、航空等领域有良好的应用前景<sup>[8-10]</sup>。

近年来,学者针对磁场调制式齿轮的拓扑结构、磁场调制机理及输出特性等开展了广泛研究<sup>[11-15]</sup>。文献<sup>[16]</sup>通过解析与试验验证了磁齿轮传动原理;文献<sup>[17]</sup>通过优化磁极结构,实现输出转矩提升与转矩脉动下降;文献<sup>[18]</sup>提出的双调制结构提升了输出转矩;文献<sup>[19]</sup>改进了冷却方式,有效降低了温升;文献<sup>[20]</sup>通过建模仿真分析了瞬态特性。

然而,现有研究多针对低功率、小调制比场合,对航空用大型高传动比磁场调制式齿轮的研究较少。因此,本文将一台大型高传动比磁齿轮为对象,研究其电磁设计方法,分析电磁特性,并校核关键部件的可靠性。

## 1 磁场调制式齿轮原理

同轴磁场调制式齿轮主要由内、外转子以及调磁环三部分构成。永磁体均匀地排布在内转子的外表面和外转子的内表面,调磁块串联成调磁环放置在内、外转子的中间位置。并且内转子永磁体极对数  $p_{in}$ 、外转子永磁体极对数  $p_{out}$  以及调磁块的个数  $N_s$  满足<sup>[21]</sup>:

$$N_s = p_{in} + p_{out} \quad (1)$$

同轴磁场调制式齿轮的工作原理为:在内转子转速  $n_{in}$  与外转子转速  $n_{out}$  满足  $n_{in}/n_{out} = p_{out}/p_{in}$  的条件下,调磁环对气隙磁场产生了调制效应,同极同步的谐波对相互耦合,进而产生了稳定的转矩<sup>[22-24]</sup>。根据麦克斯韦张量法可知,磁场耦合在内、外转子上产生的磁力转矩分别为<sup>[25]</sup>

$$\begin{cases} T_{in} = \frac{L_{ef} R_{in}^2}{\mu_0} \int_0^{2\pi} B_{r,in} B_{t,in} d\theta \\ T_{out} = \frac{L_{ef} R_{out}^2}{\mu_0} \int_0^{2\pi} B_{r,out} B_{t,out} d\theta \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $T_{in}$ 、 $T_{out}$  分别为内、外转子的磁力转矩;  $L_{ef}$  为同轴磁齿轮的轴向长度;  $R_{in}$ 、 $R_{out}$  分别为内、外气隙的半径;  $\mu_0$  为真空磁导率;  $B_{r,in}$ 、 $B_{t,in}$  分别为内气隙中磁密的径向分量、切向分量;  $B_{r,out}$ 、 $B_{t,out}$  分别为外气隙中磁密的径向分量、切向分量。

同轴磁场调制式齿轮拓扑结构如图 1 所示<sup>[26]</sup>。

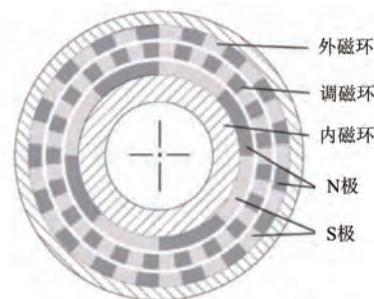


图 1 同轴磁场调制式齿轮结构图

Fig. 1 Structure diagram of coaxial magnetic field modulation gear

## 2 磁场调制式齿轮电磁优化设计

大型磁场调制式齿轮设计需在空间限制下,通过优化电磁参数提升转矩传递密度,兼顾效率与转矩波动。调磁块是关键,其数量和尺寸直接影响性能<sup>[27]</sup>。内转子极对数需适中;过小则调制作用不足,谐波多;过大则漏磁严重,装配困难。外转子极对数越大,传动比和失步转矩也越大。

调磁块尺寸由厚度和宽度比例决定<sup>[28]</sup>。失步转矩随两者增加均呈先增后降趋势,调磁块厚度过大会导致磁场回路失衡,其宽度过大会增加漏磁。为平衡转矩、转速和结构参数,采用非线性约束遗传算法。该算法通过邻域交叉高效搜索,协调冲突子目标,支持非线性约束,运算快且可靠。

在优化过程中,外非导磁子域外径,外永磁体内、外径,调磁环内、外径,调磁块宽度比例,内转子永磁体内、外径,内非导磁子域内径 9 个结构参数的变化会影响输出转矩。因此,设置外永磁体外径范围为 200~350 mm;内转子永磁体内径范

围为 150~300 mm,取长度间隔为 0.5 mm。考虑机械加工工艺和材料应力,选取内气隙长度为 1.2 mm,外气隙长度为 0.7 mm。将总体大小设置为 100,交叉概率设置为 0.7,突变概率设置为 0.000 5,迭代次数设置为 2 000,优化目标设置为输出转矩平均值达到 2.5 kN·m,且转矩密度最大。基于该算法,得到一个可行的磁场调制式齿轮优化方案,基本参数如表 1 所示。

表 1 磁场调制式齿轮主要参数

Tab. 1 Main parameters of magnetic field modulation gear

参数名称	参数值
输出功率/kW	500
输出转矩/(kN·m)	2.4
减速比	10.27
有效部分长/mm	150
有效部分外径/mm	280

### 3 磁场调制式齿轮性能仿真分析

#### 3.1 电磁性能有限元仿真分析

根据设计方案,在有限元分析软件中构建的磁场调制式齿轮的二维模型如图 2 所示。设计方案采用 Halbach 充磁,其气隙磁密正弦性优于平行径向充磁,且极值点更高。Halbach 的单边效应可降低轭铁厚度要求,甚至取消轭铁,减轻齿轮质量。

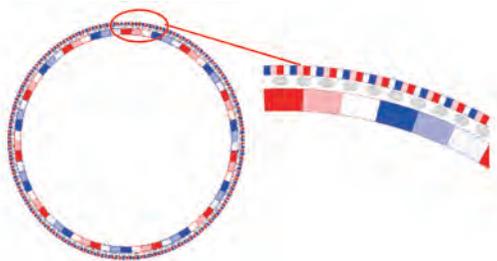


图 2 磁场调制式齿轮二维模型图

Fig. 2 2D model diagram of magnetic field modulation gear

设计方案中模型由内侧转子、外侧定子和旋转的调磁环组成,其中内侧转子、外侧定子由永磁体组成,内侧转子中永磁体每极包含三小块永磁体,外侧定子中永磁体每极包含两小块永磁体,其分别对应的充磁方式如图 3 所示。

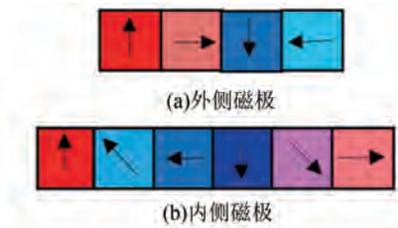


图 3 磁极充磁方式

Fig. 3 Magnetization method for magnetic pole

磁场调制式齿轮的网格划分需平衡精度与效率。网格越小,结果越精确,但计算量增加。Halbach 型齿轮的网格效果如图 4 所示,调磁块和永磁体部分需密集划分以确保关键参数的准确性。

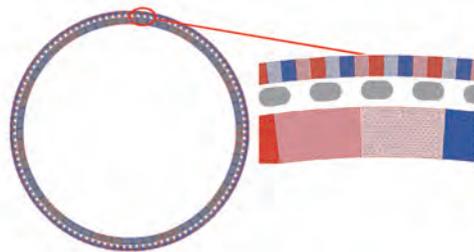


图 4 Halbach 型齿轮的网格剖分图

Fig. 4 Mesh partition diagram of Halbach-type gear

磁场调制式齿轮磁力线分布图、磁密分布云图分别如图 5、6 所示。由图 5 可知,磁力线沿线对称分布,且漏磁较少,说明磁路设计合理。同时 Halbach 磁极结构具有聚磁效应,可省去铁心轭部,从而减轻齿轮质量并提升转矩密度。

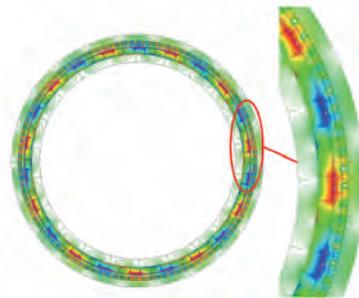


图 5 磁场调制式齿轮磁力线分布图

Fig. 5 Magnetic field line distribution diagram of magnetic field modulation gear

由图 6 可知,调磁环磁密最大值为 2.19 T,接近 1J22 铁磁材料的饱和点(2.4 T),可最大化利用铁磁材料,以提升转矩密度。永磁体磁密范围为 0.86~1.30 T,牌号永磁体在此区间内可稳定高效运行。

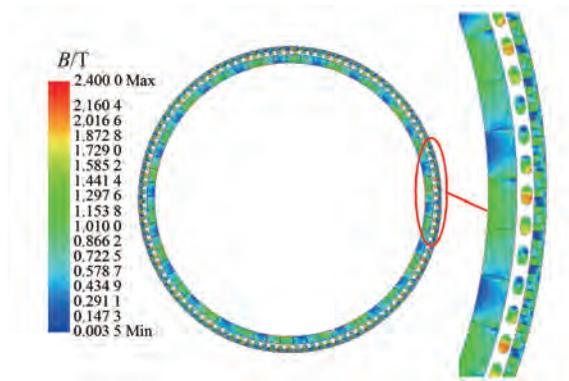


图 6 磁场调制式齿轮磁密分布云图

Fig. 6 Magnetic field density distribution contour of magnetic field modulation gear

磁场调制式齿轮运行过程中内外两个转子之间的转速受到其传动比的约束,故内转子为主动轮的时候,外转子必定为从动轮。按照 10.27 的调制比,对应的输出转速为 1 947 r/min,其输入和输出转矩波形如图 7 所示。

由图 7 可知,磁场调制式齿轮的输入、输出转矩分别为 0.249 kN·m、2.48 kN·m,两者均保持平稳。输出与输入转矩比为 9.96,与理论传动比 10.27 高度吻合,验证了设计的合理性及运行的稳定性。仿真结果进一步表明,齿轮运行平稳,转矩传递效率接近理论值,输出功率达到 505.6 kW,完全满足设计要求。

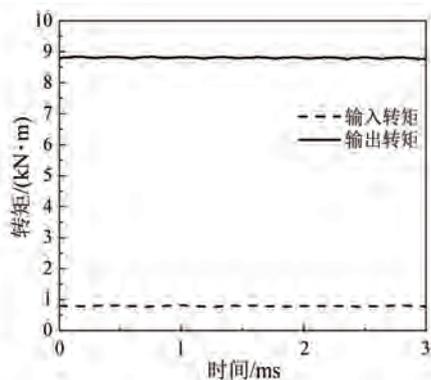


图 7 磁场调制式齿轮转矩波形图

Fig. 7 Torque waveforms diagram of magnetic field modulation gear

磁场调制式齿轮在运行时将产生损耗,包括调磁环上产生的磁滞损耗和调磁环两侧永磁体上产生的涡流损耗。根据建立的有限元模型,磁场调制式齿轮稳定运行时产生的损耗如图 8 所示。

由图 8 可知,磁场调制式齿轮稳定运行时,调

磁环上的磁滞损耗为 1.97 kW,涡流损耗为 2.13 kW。磁场调制式齿轮运行过程中,还存在 1% 的机械损耗(5 kW)和其他附加损耗(9.1 kW),则总损耗功率  $\Delta P$  为 20 kW,输出功率为 505.58 kW,磁场调制式齿轮的效率为 96.17%。结果表明,该磁场调制式齿轮设计合理,运行效率高。

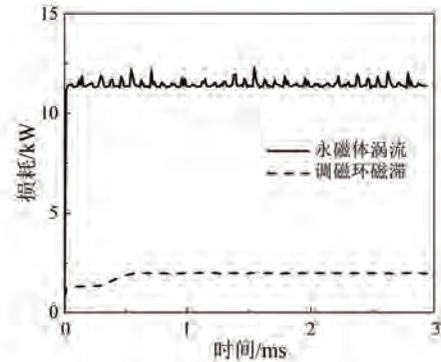


图 8 磁场调制式齿轮损耗波形图

Fig. 8 Loss waveforms diagram of magnetic field modulation gear

基于有限元模型,通过场计算器获取内、外层气隙的径向磁通密度分布,结果如图 9、10 所示。

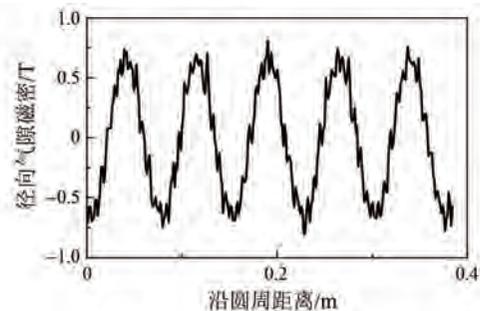


图 9 内层气隙径向磁通密度分布图

Fig. 9 Radial magnetic flux density distribution diagram of inner air gap

由于外层磁极数远多于内层,外层气隙磁密更为密集。内层气隙基波磁通密度的最大值为 0.75 T,而外层则达到 1.53 T,较高的磁密值有助于提供更大的转矩。此外,内、外层磁通密度的分布均接近正弦波形,谐波成分较少,确保了磁场调制式齿轮的平稳运行。

### 3.2 三维应力场仿真分析

护套设计的关键是平衡应力与电磁性能:既要保证高速下的转子安全,又要最小化厚度以优化磁路。碳纤维材料因其各向异性和高强度<sup>[29-32]</sup>,为理想选择。

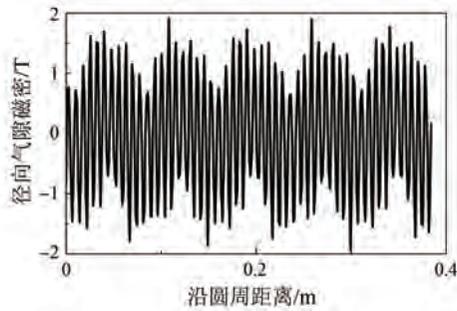


图 10 外层气隙径向磁通密度分布图

Fig. 10 Radial magnetic flux density distribution diagram of outer air gap

磁场调制式齿轮由定子外壳、转轴、内外永磁体、调磁环、转子支架及护套等构成。作为动力传动部件,其结构强度需重点校核以确保工作稳定性。

仿真中,永磁体材料设为钕铁硼 N48SH,调磁环导磁块采用铁钴合金 1J22,其余结构件使用碳纤维 T700。为提升计算效率,模型中已将轴承等部件简化为等效圆环。

内侧转子转速较高,需粘接好永磁体后在其表面绑扎碳纤维护套,护套厚度 0.7 mm,过盈量 0.1 mm,护套抗拉强度 1 960 MPa。对内侧转子的机械强度进行仿真,得到内侧转子应力分布云图如图 11 所示。仿真结果显示,内侧转子所受应力最大值为 203.99 MPa,受力最大位置为转子支架筋板连接处。

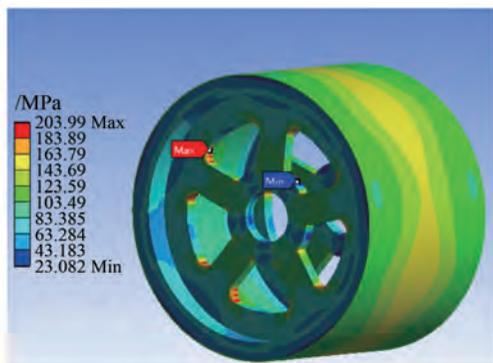


图 11 内侧转子应力分布云图

Fig. 11 Stress distribution contour of inner rotor

内侧转子护套的应力分布云图如图 12 所示。仿真结果显示,护套所受应力最大值为 155.06 MPa,远小于材料许用值。

内侧转子永磁体的应力分布云图如图 13 所示。永磁体的抗拉强度为 80 MPa,仿真结果显

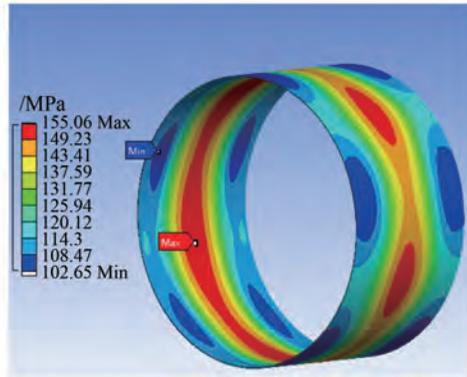


图 12 内侧转子护套应力分布云图

Fig. 12 Stress distribution contour of inner rotor sleeve

示,内侧转子永磁体应力最大值为 69.894 MPa。结果表明,在稳定运行和转矩传递过程中,内侧转子各部件的应力均在安全范围内,结构强度可靠。

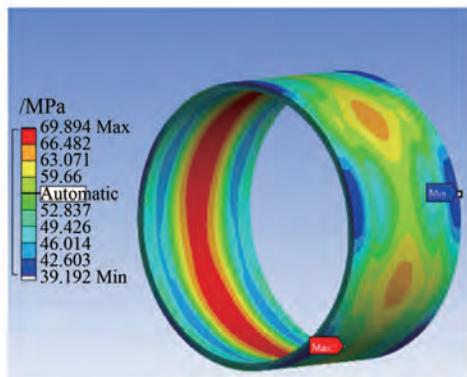


图 13 内侧转子永磁体应力分布云图

Fig. 13 Stress distribution contour of inner rotor permanent magnet

对另一个旋转部分调磁环及其支架进行应力分析,调磁环中调磁块所用铁钴合金 1J22 的抗拉强度为 850 MPa,其余部件均为碳纤维。

外侧转子应力分布如图 14 所示。由图 14 可知,磁场调制式齿轮运行时外侧转子应力最大值为 649.53 MPa,出现在调磁环处。结果表明,在稳定运行和转矩传递过程中,外侧转子的调磁环和支架所受应力均在材料许用应力范围内,亦均满足强度要求。

### 3.3 三维温度场仿真分析

磁场调制式齿轮传动过程中产生的涡流损耗会以热量的形式散失,而温度过高会导致永磁体磁性能下降甚至退磁,故磁齿轮选择合适的温度

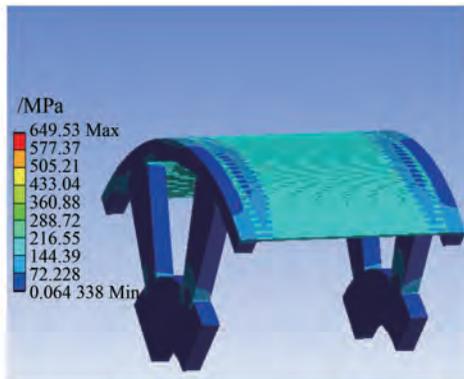


图 14 外侧转子应力分布云图

Fig. 14 Stress distribution contour of outer rotor

范围是非常重要的。

根据传热学的基本原理,磁场调制式磁齿轮三维稳态传热方程可表示为<sup>[33]</sup>

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z}\right) = -q_v - k \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T - T_i) \quad (3)$$

式中: $\lambda$  为材料的导热系数; $q_v$  为电机损耗各部件作为热源的单位体积的发热率; $\alpha$  为散热面的散热系数; $T$  为计算域内任意位置处的温度值; $T_i$  为环境温度。

磁场调制式齿轮主要依靠自然风冷散热。根据电磁场仿真结果得出磁齿轮各部件的损耗结果和热生成率,如表 2 所示。磁场调制式齿轮各部件所用材料的导热系数如表 3 所示。

由于散热系数与很多外部因素有关,难以用准确的数学模型表达,一般根据经验公式来确定散热系数,磁场调制式齿轮机壳外围散热系数为<sup>[34]</sup>

$$\alpha = 14(1 + 0.5\sqrt{v_c})^3 \sqrt{\frac{T_0}{25}} \quad (4)$$

式中: $v_c$  为磁场调制式齿轮机壳的内壁风速; $T_0$  为磁力齿轮机壳外表面的温度。

表 2 磁场调制式齿轮各部件的损耗和生热率

Tab. 2 Loss and heat generation rates of each component in the magnetic field modulation gear

部件	损耗/kW	体积/cm <sup>3</sup>	生热率/(kW·m <sup>-3</sup> )
外侧永磁体	1.52	393	3 867.68
调磁环	1.97	177	11 129.94
内测永磁体	0.61	878	694.76

表 3 磁场调制式齿轮各部件的导热系数

Tab. 3 Thermal conductivity of various components in the magnetic field modulated gear

部件	导热系数/(W·m <sup>-1</sup> ·°C)
空气	0.023
碳纤维	0.43
永磁体	7.5
	$\lambda_x = 48$
铁钴合金	$\lambda_y = 48$
	$\lambda_z = 1.7$

根据图 15 所示的温度场仿真结果可知,磁场调制式齿轮在稳定工作时,最高温度出现在外侧定子永磁体周围,为 85.73 °C。这主要是由于该区域永磁体单位体积产热较大,且处于静止状态,表面散热条件较差。此外,碳纤维外壳包裹进一步限制了热量散出,导致热量积聚。相比之下,高速旋转的内永磁体与调磁环表面散热系数较高,因而温度相对较低。

该齿轮采用自然冷却方式,机壳材料为碳纤维,其导热性能较弱。热量需先传导至机壳,再通过机壳表面与外部空气进行热交换,因此机壳处温度最低,为 75.05 °C。

内侧转子永磁体由于转速较高,其散热系数比低速旋转的调磁环要好。虽然内侧永磁体和调磁环的最高温度相差不多,但调磁环的平均温度要高于内侧永磁体的平均温度,永磁体(N48SH)的最高温度为 85.73 °C,最大许用温度为 150 °C,因而磁场调制式齿轮可以稳定运行。

## 4 结语

本文设计了一台输出功率为 500 kW 的磁场调制式齿轮,对其输出特性、结构强度和温升情况进行了多物理场仿真分析,得出以下主要结论。

(1) 通过非线性约束遗传算法进行多目标优化,综合考虑输出转矩、转矩波动、效率和空间尺寸,可以快速得到较为理想的电磁设计方案。所设计磁场调制式齿轮可以满足大功率输出要求,在较大调制比下可以稳定运行,效率达到 96.17%。

(2) 内侧高速转子通过碳纤维护套绑扎,外侧低速调磁环通过支架固定。在稳定工作状态下,各部件的最大应力均低于对应材料的许用应力。此外,调磁块与磁极采用叠压结构,有助于显

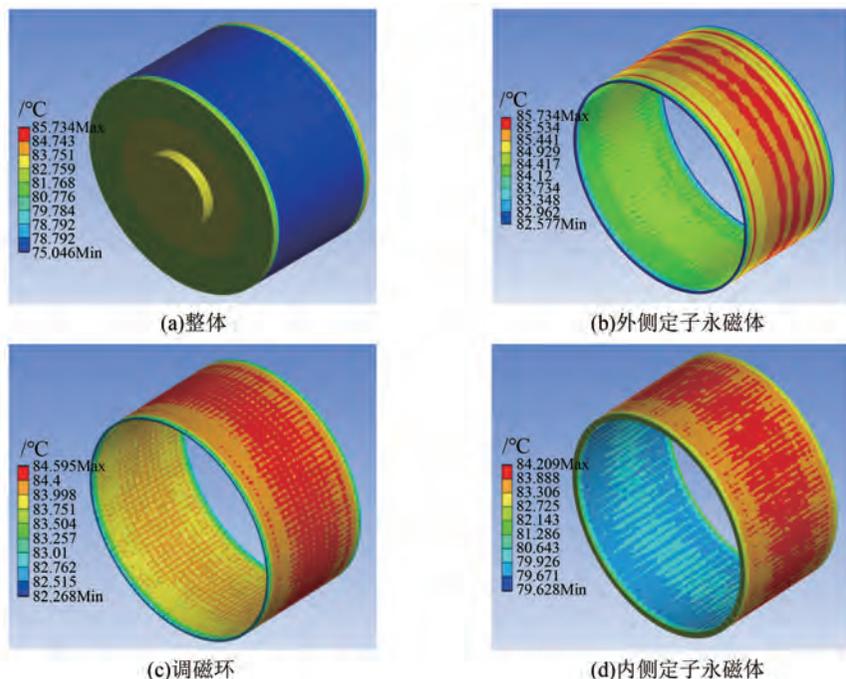


图 15 磁场调制式齿轮的温度场仿真云图

Fig. 15 Temperature field simulation contour of magnetic field modulation gear

著降低铁心损耗。

温度场仿真结果表明,整机最高温度位于外侧定子永磁体周围,为 85.73 °C,各部件温度均处于材料许用温度范围内。该结果验证了所提设计方案在机械与热性能上的可靠性,可为后续工程样机的试制提供参考依据。

#### 利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

#### 作者贡献

陈亚千、韩劲进行了方案设计、内容总结与论文撰写,赵曙光、陈梦浩进行了仿真分析,覃秋霞、欧阳瑞斌参与了论文的审核与修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

The scheme design, content summary and paper writing were carried out by Chen Yaqian and Han Jin. The simulation analysis was conducted by Zhao Shuguang and Chen Menghao. The manuscript was revised by Tan Qiuxia and OuYang Ruibin. All authors have read and approved the final version of

the paper for submission.

#### 参考文献

- [ 1 ] Tao G H, Praslicka B, Hasanpour S, et al. Experimental comparison of acoustic characteristics for a high-efficiency magnetic gearbox and a mechanical planetary gearbox for industrial HVAC applications [ J ]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2024, 39(1): 182-190.
- [ 2 ] Akyerden E, Cansiz A. Investigation of magnetic gear system based on the use of superconductor and permanent magnet [ J ]. IEEE Access, 2025, 13: 31159-31170.
- [ 3 ] 田士强,安辉,陆艳君,等.真空泵用反凸极永磁同步电机设计与性能分析[J].电机与控制应用,2024,51(5):72-80.  
Tian S Q, An H, Lu Y J, et al. Design and performance analysis of negative salient pole permanent magnet synchronous motor for vacuum pump [ J ]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(5): 72-80.
- [ 4 ] 曲荣海,李大伟,赵钰.磁场调制电机的由来、发展与挑战[J].中国电机工程学报,2024,44(18):7361-7381.  
Qu R H, Li D W, Zhao Y. The origin, development

- and challenge of flux modulation machine [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(18): 7361-7381.
- [5] Shoaie A, Wang Q S. A comprehensive review of concentric magnetic gears [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2024, 10(3): 5581-5598.
- [6] 刘东宁, 葛研军, 杨均悦, 等. 多轴环板永磁齿轮偏心磁场计算及动态特性分析[J]. 机械工程学报, 2025, 61(9): 372-382.
- Liu D N, Ge Y J, Yang J Y, et al. Calculation of eccentric magnetic field and dynamic characteristics analysis of multi-shafts ring-plate magnet gear [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2025, 61(9): 372-382.
- [7] Shrivastava N, Sashidhar S, Subudhi B. A novel dual magnetically geared Halbach array-based tubular linear permanent magnet generator for wave energy conversion [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2025, 61(9): 8101805.
- [8] 魏立军, 王晋中, 鲁仰辉, 等. 分块充磁永磁体对磁齿轮磁密及涡流损耗影响[J]. 机械传动, 2024, 48(1): 94-98.
- Wei L J, Wang J Z, Lu Y H, et al. Effect of permanent magnet made by blocking magnetization on magnetic density and eddy current loss of permanent magnet transmission [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2024, 48(1): 94-98.
- [9] Xie S C, Zuo Y F, Song Z X, et al. A magnetic-geared machine with improved magnetic circuit symmetry for hybrid electric vehicle applications [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2024, 10(1): 2170-2182.
- [10] Molokanov O. A novel OrbiTran magnetically geared rotating electrical machine [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2025, 61(8): 8201911.
- [11] 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 X, Lu M, Lin P T, 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.
- [12] 徐航, 黄平林. 聚磁式转子轴向磁齿轮复合电机的有限元分析[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(8): 50-58.
- Xu H, Huang P L. Study on an axial magnetic gear composite motor with spoke-type rotor by finite element method [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(8): 50-58.
- [13] 赵曙光, 陈策, 谢孝昌, 等. 基于直线模型提升同轴磁齿轮设计效率的研究[J]. 系统仿真学报, 2025, 37(6): 1574-1581.
- Zhao S G, Chen C, Xie X C, et al. Research on improving design efficiency of coaxial magnetic gear based on linear model [J]. Journal of System Simulation, 2025, 37(6): 1574-1581.
- [14] Masoudi M A, Afsari S A. The optimal design and an analysis of a hybrid w-shaped IPM rotor of coaxial magnetic gear [J]. IEEE Access, 2024, 12: 81067-81074.
- [15] 张进, 张秋菊. 双磁场调制磁齿轮转矩能力增强特性分析[J]. 电机与控制学报, 2021, 25(1): 136-142.
- Zhang J, Zhang Q J. Dual-flux-modulated magnetic gear for torque capability improvement [J]. Electric Machines and Control, 2021, 25(1): 136-142.
- [16] 陈泳丹, 田真, 沈宏继, 等. 同轴磁场调制式磁齿轮电磁优化设计[J]. 兵工学报, 2021, 42(10): 2206-2214.
- Chen Y D, Tian Z, Shen H J, et al. Electromagnetic optimization design of coaxial magnetic field modulated magnetic gears [J]. Acta Armamentarii, 2021, 42(10): 2206-2214.
- [17] 井立兵, 闵泽宇, 王涛, 等. 带 Spoke 和凸-T 型结构的同轴磁齿轮磁场分析与优化[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(20): 8225-8235.
- Jing L B, Min Z Y, Wang T, et al. Magnetic field analysis and optimization of coaxial magnetic gear with Spoke and convex-T structure [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(20): 8225-8235.
- [18] 吴鹏, 朱姿娜, 李开元. 双调制同轴磁齿轮的结构设计与传动性能分析[J]. 机械传动, 2019, 43(6): 43-47.
- Wu P, Zhu Z N, Li K Y. Structural design and transmission performance analysis of double modulated coaxial magnetic gear [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2019, 43(6): 43-47.
- [19] 周钰峰, 罗帅, 陈航, 等. 基于脉动热管和强制风冷的同轴式磁齿轮高效热管理[J]. 机械传动, 2025, 49(4): 117-125+138.
- Zhou Y F, Luo S, Chen H, et al. Efficient thermal

- management of coaxial magnetic gears with pulsating heat pipe and forced air cooling [J]. *Journal of Mechanical Transmission*, 2025, 49(4): 117-125+138.
- [20] 刘晓, 赵云云, 黄守道, 等. 双磁场调制同轴磁齿轮瞬态和振动特性分析[J]. *电工技术学报*, 2019, 34(9): 1865-1874.
- Liu X, Zhao Y Y, Huang S D, et al. Investigation of the transient and vibration characteristics of a dual-flux-modulator coaxial magnetic gear [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(9): 1865-1874.
- [21] 郭培遥, 梁建伟, 王昕华, 等. 辐条式磁齿轮电机齿槽转矩抑制[J]. *电机与控制应用*, 2023, 50(7): 66-73+80.
- Guo P Y, Liang J W, Wang X H, et al. Cogging torque suppression of spoke magnetic gear motor [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2023, 50(7): 66-73+80.
- [22] 程文杰, 王瑜琛, 肖玲, 等. 基于磁网络法的正弦调磁环磁齿轮研究[J]. *微特电机*, 2025, 53(1): 10-18.
- Cheng W J, Wang Y C, Xiao L, et al. Research of sinusoidal magnetic ring magnetic gear based on magnetic network method [J]. *Small & Special Electrical Machines*, 2025, 53(1): 10-18.
- [23] 王博文, 安辉, 陆艳君, 等. 真空干泵用永磁-磁阻复合式同步电机设计与分析[J]. *电机与控制应用*, 2024, 51(7): 64-73.
- Wang B W, An H, Lu Y J, et al. Design and analysis of permanent magnet-reluctance composite synchronous motor for vacuum dry pumps [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2024, 51(7): 64-73.
- [24] 赵晓坤, 黄梓旭, 郭启超, 等. 不对称转子永磁辅助同步磁阻电机转矩比例系数对转矩提升能力的影响研究[J]. *电机与控制应用*, 2025, 52(8): 879-887.
- Zhao X K, Huang Z X, Guo Q C, et al. Investigation of torque proportion coefficient impact on torque enhancement in the asymmetric rotor PMA-SynRM [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2025, 52(8): 879-887.
- [25] Ding J X, Liu Y M, Huang S J, et al. 3-D magnetic field mathematical model considering the eccentricity and inclination of magnetic gears [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2024, 60(11): 8000815.
- [26] 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*, 2024, 60(14): 347-363.
- Yuan X M, Pang H D, Gao H F, et al. Research overview on field modulated magnetic gear [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2024, 60(14): 347-363.
- [27] Iwaki K, Nakamura K. Experimental improvement of speed-torque characteristics in magnetic-gear switched reluctance motor [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2025, 61(9): 8202605.
- [28] 程文杰, 路慧泽, 肖玲, 等. 高速磁场调制式磁齿轮流场及温度场分析[J]. *机械传动*, 2023, 47(4): 115-122+130.
- Cheng W J, Lu H Z, Xiao L, et al. Fluid field and temperature field analysis of high speed magnetic field modulated gears [J]. *Journal of Mechanical Transmission*, 2023, 47(4): 115-122+130.
- [29] 刘海龙, 谢峰. 内置式永磁电机碳纤维护套转子强度及过盈量分析[J]. *电机与控制应用*, 2023, 50(2): 20-23+35.
- Liu H L, Xie F. Strength and interference analysis of carbon fiber sleeve rotor for interior permanent magnet motor [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2023, 50(2): 20-23+35.
- [30] 朱军, 李宜飞, 刘瞳亮, 等. 双重水循环航空泵用屏蔽电机研究[J]. *电机与控制应用*, 2025, 52(2): 136-147.
- Zhu J, Li Y F, Liu T L, et al. Research on shielded motors for dual water circulation aviation pumps [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2025, 52(2): 136-147.
- [31] 龚佳乐, 李明, 郑继鑫. 过载对屏蔽式永磁同步电机性能的影响[J]. *电机与控制应用*, 2025, 52(4): 412-421.
- Gong J L, Li M, Zheng J X. Effect of overload on performance of canned permanent magnet synchronous motors [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2025, 52(4): 412-421.
- [32] 陈子淋, 李明, 王蓉, 等. 定子齿开槽对屏蔽式永磁同步电机齿槽转矩的影响[J]. *电机与控制应用*, 2025, 52(4): 432-441.
- Chen Z L, Li M, Wang R, et al. Effect of stator tooth slotting on cogging torque of canned permanent

- magnet synchronous motor [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2025, 52(4): 432-441.
- [33] Tang P, Zhao Z G, Li H D. Short-term prediction method of transient temperature field variation for PMSM in electric drive gearbox using spatial-temporal relational graph convolutional thermal neural network [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2024, 71(7): 7839-7852.
- [34] Wang S C, Chen J H, Yang J T, et al. Analysis of temperature rise in short-term high overload torque motor with LPTN considering demagnetization and saturation [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2025, 40(3): 2268-2279.
- 
- 收稿日期:2025-09-30  
收到修改稿日期:2025-12-15  
作者简介:  
陈亚千(1990—),男,博士,讲师,研究方向为特种电机设计及控制,chenyaqian@sut.edu.cn;  
\*通信作者:韩 劲(1971—),男,博士,研究员,研究方向为磁性材料、形状记忆合金和弹性合金等功能材料与器件,jinhan\_biam@sina.com。