

文章编号:1006-1355(2023)04-0042-07+193

## 基于遗传算法和TOPSIS法的 混合励磁电机齿槽转矩优化

庞亮<sup>1</sup>, 杨清亮<sup>2</sup>, 赵朝会<sup>1</sup>, 申合彪<sup>1</sup>, 张闻东<sup>1</sup>, 秦海鸿<sup>3</sup>

(1. 上海电机学院 电气学院, 上海 201306;

2. 上海海事大学 物流工程学院, 上海 201306; 3. 南京航空航天大学 自动化学院, 南京 210016)

**摘要:**针对切向聚磁型并联结构混合励磁电机(TMPS-HESM)随着励磁电流增加导致齿槽转矩剧增容易引发电机振动噪声的问题,根据齿槽转矩的产生原理,探讨改变转子极靴宽度、磁极偏心距和气隙长度削弱电机齿槽转矩的可行性。借助Maxwell and Workbench and Optislong联合仿真软件建立8极48槽TMPS-HESM模型,运用遗传算法进行全局多目标优化,得到pareto最优解集后使用优劣解距离法(TOPSIS)客观选取最优解。最后对比分析优化前后电机的各项其他性能,结果表明:采用遗传算法和TOPSIS法对电机参数进行优化,能提升电机多目标优化效率,不仅可解决混合励磁电机励磁电流增加导致齿槽转矩剧增的问题,还能有效削弱电机转矩脉动,提升电机平均转矩,在减少电机的振动噪声和提高电机输出转矩方面均取得改善。

**关键词:**振动与波;混合励磁;遗传算法;TOPSIS法;齿槽转矩;振动噪声

中图分类号:TM301.4<sup>3</sup>

文献标志码:A

DOI编码:10.3969/j.issn.1006-1355.2023.04.007

## Optimization of Cogging Torque of Hybrid Excitation Motors Based on Genetic Algorithm and TOPSIS Method

PANG Liang<sup>1</sup>, YANG Qingliang<sup>2</sup>, ZHAO Chaohui<sup>1</sup>,  
SHEN Hebiao<sup>1</sup>, ZHANG Wendong<sup>1</sup>, QIN Haihong<sup>3</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Shanghai Dian Ji University, Shanghai 201306, China;

2. Logistics Engineering College, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China;

3. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,  
Nanjing 210016, China)

**Abstract :** The problem that the cogging torque of tangential magnetizing parallel structure of hybrid excitation synchronous motor (TMPS-HESM) increases rapidly with the increase of the excitation current is studied. According to the principle of cogging torque generation, the feasibility of changing the rotor pole shoe width, magnetic pole eccentricity and air gap length to reduce the cogging torque is discussed. With the help of Maxwell and Workbench and Optislong co-simulation software, the model of 8-pole and 48-slot TMPS-HESM is established. The genetic algorithm is used for global multi-objective optimization. After the pareto optimal solution set is obtained, the optimal solution is selected objectively by using the superior and inferior solution distance method (TOPSIS). Finally, the other performances of the motor before and after the optimization are compared and analyzed. The results show that using genetic algorithm and TOPSIS method to optimize the motor parameters can improve the efficiency of multi-objective optimization of the motor. It not only solves the problem of the rapid increase of cogging torque caused by the increase of the excitation current of the hybrid excitation motor, but also effectively weakens the torque ripple and improve the average torque. The vibration and noise of the motor are reduced and the output of the motor is improved.

**Key words :** vibration and wave; hybrid excitation; genetic algorithm; TOPSIS method; cogging torque; vibration noise

收稿日期:2022-04-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51677089)

作者简介:庞亮(1996-),男,广西壮族自治区桂林市人,硕士研究生,专业方向为电机振动噪声优化。

E-mail: 1048789838@qq.com

通信作者:赵朝会,男,硕士生导师,专业方向为电机与电器、电力电子与传动。

近年来,为了保障能源和环境安全,我国提出一系列促进能源结构升级的政策,在工业领域大力发展以体积小、重量轻、高功率密度、高转矩密度为优点的永磁电机<sup>[1-2]</sup>。然而永磁电机仅有单一励磁源,导致其气隙磁场调节困难,很大程度限制了电机弱磁调节下的升速能力和增磁调节下的增矩能力,以

及发电运行时的稳定调压能力<sup>[3]</sup>,为实现永磁电机气隙磁场可调节,混合励磁电机逐渐成为了研究热点。混合励磁电机具有多个励磁源,其中永磁励磁源的存在使得混合励磁电机具有高效率、高功率密度等特点,电励磁励磁源使得混合励磁电机气隙磁场调节方便。因此,混合励磁电机在新能源汽车、舰船推进、航空航天等领域具有非常广泛的应用前景<sup>[4]</sup>。

TMPS-HESM是一种增磁增矩能力优良的混合励磁电机。随着电励磁绕组电流的增大,电机气隙磁密增大明显,容易引起气隙磁密谐波增加,从而导致电机齿槽转矩增大,并产生电机转矩脉动、振动噪声等不良现象。

因此,诸多学者在降低电机齿槽转矩方面进行了大量研究。吴战等<sup>[5]</sup>研究了永磁同步电主轴电机的槽宽和永磁体偏心对齿槽转矩的影响。蒋迪元等<sup>[6]</sup>为解决高速永磁同步电机的永磁体和槽铁心相互作用而导致齿槽转矩过大问题,通过在转子齿开槽优化了电机结构,降低了电机齿槽转矩。邢泽智等<sup>[7]</sup>以6极36槽表贴式永磁电机为例,采用不同极弧系数和不同分段磁极并结合有限元仿真和粒子群算法对电机齿槽转矩进行优化,确定了最佳极弧系数和分段磁极倾斜角,有效降低了该电机齿槽转矩。石松宁等<sup>[8]</sup>利用解析法和有限元法对永磁驱动器采用斜极结构进行齿槽转矩削弱,并利用粒子群算法对其主要参数进行优化,在有效削弱永磁驱动器齿槽转矩的同时降低了转矩脉动。张文晶等<sup>[9]</sup>对一台盘式横向磁通永磁电机采用神经网络与多目标粒子群算法结合的优化方式,有效降低了电机体积和质量,削弱了该电机的齿槽转矩。李烽等<sup>[10]</sup>建立了交替极永磁电机气隙磁密不对称情况下的齿槽转矩模型,研究了气隙磁场偶次谐波对齿槽转矩、电机反电势和电磁转矩脉动的影响规律。王道涵等<sup>[11]</sup>设计了一种两段式交错磁极转子结构,以降低电机齿槽转矩和转矩脉动,建立了该电机有限元仿真模型与传统的分段结构进行对比,结果表明,交错磁极转子电机的齿槽转矩等电磁特性明显优于常规磁极分段电机。朱晓锋等<sup>[12]</sup>讨论了定子永磁型磁通切换电机的齿槽转矩产生原因,并且采用开辅助槽、斜极、削角等一系列措施抑制齿槽转矩,对该电机齿槽转矩的抑制方法具有指导作用。夏加宽等<sup>[13-14]</sup>对一台表贴式永磁同步电机定子开辅助槽,分析了槽型和槽深等因素对齿槽转矩的影响。杨玉波等<sup>[15]</sup>研究了内置V型永磁同步电机的极弧系数对齿槽转矩的影响,采用参数化建模进行扫描,确定了最优的极弧系数。

综上所述,众多学者主要通过优化电机磁极、极弧系数、开辅助槽等方法降低永磁电机齿槽转矩。

但是针对混合励磁电机齿槽转矩的抑制研究很少,并且部分对于齿槽转矩的研究仅考虑到优化齿槽转矩,没有进行多目标优化,无法保证电机其他性能保持不变或者得到优化。本文首先根据齿槽转矩理论,推导出转子极靴宽度、磁极偏心距和气隙长度变化来削弱电机齿槽转矩的可行性。然后借助Maxwell & Workbench & Optislong联合仿真软件,并采用遗传算法和TOPSIS法对电机的齿槽转矩、转矩脉动、平均转矩进行多目标优化。最后对比优化前后电机的各项性能。结果表明,搭建混合励磁电机联合仿真平台并采用遗传算法和TOPSIS法对电机转子极靴宽度、磁极偏心距和气隙长度进行优化,在有效削弱电机齿槽转矩的同时,电机转矩脉动和平均转矩等其他性能也得到优化。齿槽转矩和转矩脉动的降低可以改善电机振动噪声,这对混合励磁电机等结构复杂的电机优化具有参考价值。

## 1 齿槽转矩理论分析

齿槽转矩是电机绕组不通电时永磁体和铁心相互作用产生的转矩,为了方便分析,做了如下假设<sup>[16-17]</sup>:

- (1) 铁心磁导率无穷大,即 $\mu_0=\infty$ ;
- (2) 忽略漏磁和边缘效应;
- (3) 电机磁性能相同并均匀分布。

TMPS-HESM的永磁体和励磁线圈共同组成转子磁路部分,线性简化得到电机磁共能:

$$W_{\text{coenergy}} = \frac{1}{2} Li^2 + \frac{1}{2} (R + R_m) \varphi^2 + Ni\varphi \quad (1)$$

式中分别为电机自感、永磁和互感磁共能。 $R$ 为气隙磁阻; $R_m$ 为铁心磁阻; $\varphi$ 为永磁体和励磁绕组与电枢绕组形成的磁通。可得电机转矩为:

$$T_e = \frac{\partial W_{\text{coenergy}}}{\partial \alpha} \quad (2)$$

当电流为恒值,齿槽转矩可以近似气隙中磁阻变化和磁场作用产生,则齿槽转矩表达式为:

$$T_{\text{cog}} = -\frac{1}{2} \varphi_g^2 \frac{dR}{d\alpha} \quad (3)$$

可以看出,电机齿槽转矩与气隙磁通 $\varphi_g$ 及随着转子变化的磁阻变化率有关系。根据能量法,电机磁共能 $W$ 对转子位置角的负导数为齿槽转矩,由于空气和永磁体磁导率远小于铁心,因此电机磁场能量集中于永磁体和气隙间。当定转子相对运动时,永磁体能量可认为是恒定的,磁场中的能量近似为气隙能量。则齿槽转矩表达式为:

$$T_{\text{cog}}(\alpha) = -\frac{\partial W}{\partial \alpha} = -\frac{\partial W_{\text{PM}} + \partial W_{\text{airgap}}}{\partial \alpha} \approx -\frac{\partial W_{\text{airgap}}}{\partial \alpha} \quad (4)$$

气隙中的磁共能为:

$$W_{\text{airgap}} = \frac{1}{2\mu_0} \int_V B^2(\theta, i_f) dV = \frac{1}{2\mu_0} \int_V B_r^2(\theta, i_f) G^2(\theta, \alpha) dV \quad (5)$$

式中:  $\alpha$  为定转子相对位置;  $\mu_0$ 、 $V$  为气隙磁导率和体积;  $B(\theta, i_f)$  为气隙磁场分布;  $B_r(\theta, i_f)$  为永磁体剩磁分布;  $i_f$  为直流励磁电流;  $G^2(\theta, \alpha)$  为转子对气隙磁场影响。对  $B_r(\theta, i_f)$  进行傅里叶展开得:

$$B_r^2(\theta, i_f) = B_{r0}^2(i_f) + \sum_{m=1}^{\infty} B_m(i_f) \cos(mN_s\alpha) \quad (6)$$

$$B_{r0}^2 = \alpha_s B_{res}^2 \quad (7)$$

$$B_{rm} = \frac{2}{m\pi} B_{res}^2 \sin(m\alpha_s\pi) \quad (8)$$

式中:  $B_{res}$  为永磁体剩磁密度;  $\alpha_s$  为极弧系数。对  $G^2(\theta, \alpha)$  进行傅里叶展开:

$$G^2(\theta, \alpha) = G_0 + \sum_{n=1}^{\infty} G_n \cos[nN_r(\theta + \alpha)] \quad (9)$$

$$G_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} G^2(\theta, \alpha) \cos n\theta d\theta \quad (10)$$

式中:  $G_0 = \alpha_s G_s$ ;  $G_s = h_m/(h_m + \delta)$ ;  $h_m$  和  $\delta$  分别为永磁体充磁方向和气隙长度。

将式(5)至式(10)代入式(4)得齿槽转矩表达式:

$$T_{\text{cog}}(\alpha) = \frac{\pi_r L_a}{4\mu_0} (R_r^2 - R_s^2) \sum_{n=1}^{\infty} n G_n B_{mNL}(i_f) \sin(nN_r\alpha) \quad (11)$$

式中:  $L_a$  为电机轴向长度;  $R_r$  和  $R_s$  为电机定子内径和转子外径;  $i_f$  为电机励磁电流;  $G_n$  和  $B_{mNL}$  为气隙磁通密度函数的傅里叶分解系数。

由上式可知, 混合励磁电机励磁电流的变化, 会影响电机气隙磁通密度, 导致电机齿槽转矩增大。本文通过优化电机转子极靴宽度、磁极偏心距和气隙长度改变  $G_n$ , 有效削弱电机齿槽转矩。

## 2 多目标优化

### 2.1 电机基本结构及优化前齿槽转矩分析

本文基于 Maxwell 软件建立 TMPS-HESM 模型。电机结构参数如表 1 所示, 电机结构如图 1 所示。

TMPS-HESM 励磁电流的改变会导致电机气隙磁场变化, 影响电机齿槽转矩。如图 2 所示, 在电机励磁电流从 0 A 到 12 A 增大过程中, 齿槽转矩随之增大。在励磁电流为 12 A 时达到最大值  $1.5 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。为了解决励磁电流增大导致齿槽转矩剧增的问题, 对电机进行齿槽转矩优化尤其重要。

### 2.2 参数化模型建立及遗传算法优化分析

由上文知, 当励磁电流为 12 A 时, 齿槽转矩达到最大。因此选择励磁电流为 12 A 时的电机为优

表 1 电机主要参数

参数	数值
功率/kW	2.5
额定转速/(r·min <sup>-1</sup> )	3 500
槽数/极数	48/8
励磁绕组匝数	40
定子外径/mm	150
定子内径/mm	96
气隙长度/mm	0.5
铁心长度/mm	40

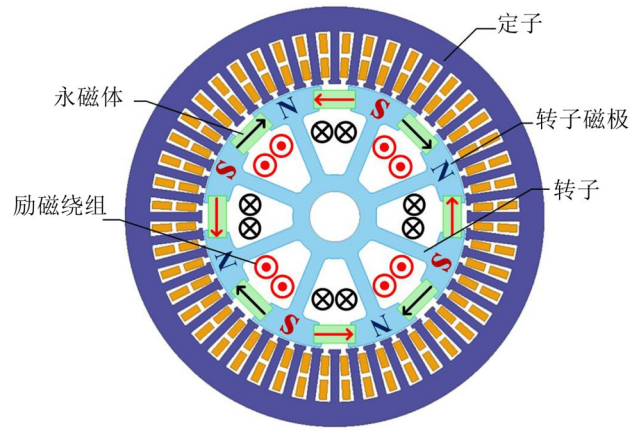


图 1 TMPS-HESM 结构示意图

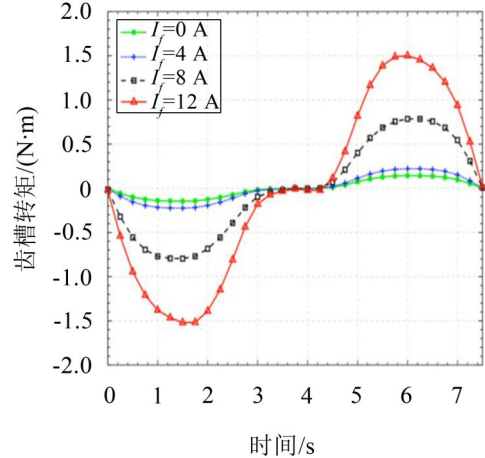


图 2 电机在不同励磁电流下齿槽转矩

化对象, 之后再对不同励磁电流条件下电机的齿槽转矩优化进行验证。

采用合适的磁极偏心距  $H$ 、转子极靴宽度  $l$  和气隙长度  $\delta$  对电机进行齿槽转矩优化, 电机优化参数化模型如图 3 所示。由上文可知极靴宽度和磁极偏心距可以有效削弱电机齿槽转矩, 引入气隙长度作为一个输入变量是为了选出更适合于极靴宽度和磁极偏心距优化的气隙长度。

由图 3 可知, 未采用磁极偏心时, 转子外径以点  $O$  为圆心, 以  $R$  为半径; 当磁极偏心距长度为  $H$  时, 转子外径以点  $O'$  为圆心, 以  $R_p$  为半径。随着磁极偏



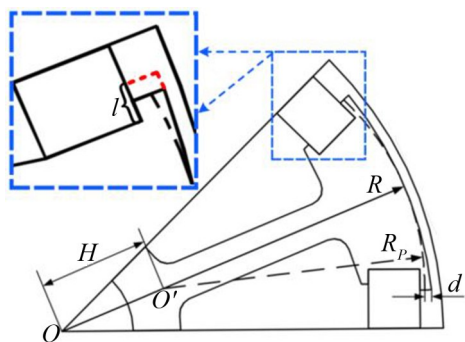


图3 电机优化参数化模型

心距 $H$ 和极靴宽度 $l$ 不同,电机的极弧系数和磁极偏心深度 $d$ 随之改变,导致气隙长度不均匀,这样就会改变气隙磁密波形分布情况而降低齿槽转矩。

运用Maxwell参数化建模功能,将电机磁极偏心距 $H$ 、转子极靴宽度 $l$ 和气隙长度 $\delta$ 设置为参数变量。根据电机实际结构尺寸确定其范围,这三个参数变量均为电机结构参数,依次对其取值范围进行说明。

磁极偏心距 $H$ 取值大于0,并随着 $H$ 数值增大,电机的磁极偏心范围逐渐增加,电机磁极偏心深度也相应增加,当 $H$ 取值为12 mm时,磁极偏心深度最大,因此磁极偏心距 $H$ 为0 mm至12 mm。

极靴长度 $l$ 为0 mm至3.5 mm,是因为考虑电机转子的实际结构要求,当 $l$ 为0 mm至3.5 mm时,电机的磁极结构较为合理,极靴长度 $l$ 过大会导致电机转子磁路过长,降低导磁效果,因此选取合适的极靴长度 $l$ 对于电机转子磁极优化至关重要。气隙长度 $\delta$ 取值过小容易使运行中的转子和定子相擦,发生扫膛故障,取值过大则会导致电机功率因数降低,可见 $\delta$ 取值以适中为宜,因此选取0.25 mm至0.5 mm之间的数值。

将Maxwell建立的参数化模型通过Workbench与Optislang进行联合仿真。使用Optislang中集成的多目标遗传算法模块对电机进行优化,设置初始群体规模为100,迭代次数为80,第一代和最后一代自适应交叉率为0.9和0.5,第一代和最后一代自适应变异率为0.04和0.07。

联合仿真优化模块介绍如图4所示,分别由有限元仿真模块、参数集和遗传算法优化模块组成。遗传算法优化流程如图5所示,遗传算法具有很强的全局寻优能力,用编码求解问题。求解过程中使用最优个体迭代和变异最优个体基因选择。基因在融合过程中会发生突变,利用目标函数进行种群个体评价分析,再通过选择、交叉、变异等方式进行组合,从而选出符合目标函数个体的繁衍概率。经过一代又一代的迭代,寻得最优解集。

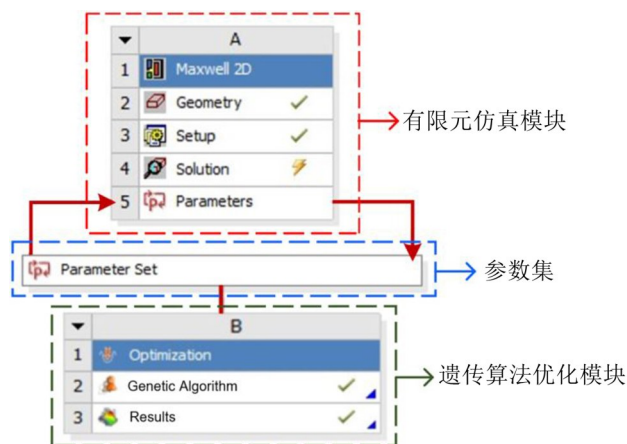


图4 联合仿真优化模块介绍

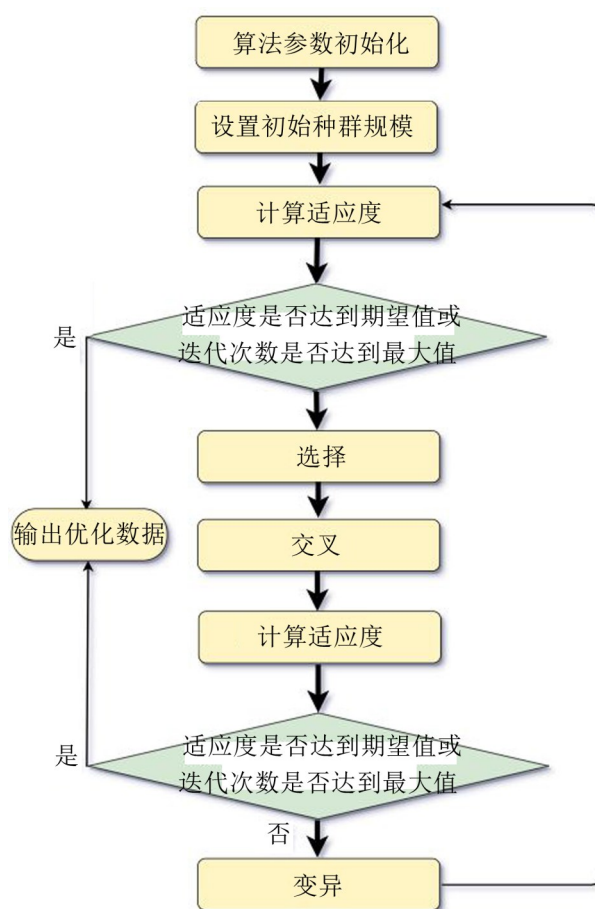


图5 遗传算法优化流程图

为了保证电机齿槽转矩优化的同时,电机其他转矩性能也得到一定程度的改进,采用多目标优化法,以转子极靴宽度、磁极偏心距和气隙长度为输入变量,以齿槽转矩、转矩脉动和平均转矩作为输出变量,分别将齿槽转矩最小、转矩脉动最小和平均转矩最大作为优化目标进行约束。具体目标函数和约束条件如下:

$$F(x) = [\min(T_{\text{cog}}), \min(T_{\text{rip}}), \max(T_{\text{avg}})]$$

$$T_{\text{cog}} < T_{\text{cog}0}, T_{\text{rip}} < T_{\text{rip}0}, T_{\text{avg}} > T_{\text{avg}0} \quad (12)$$

其中: $F(x)$ 为多目标函数, $T_{\text{cog}0}$ 、 $T_{\text{rip}0}$ 和 $T_{\text{avg}0}$ 为电机齿槽

转矩、转矩脉动和平均转矩在优化前的数值,作为优化目标要求的数值下限,分别将它们设置为 $T_{\text{cog}0}=1.5\text{N}\cdot\text{m}$ 、 $T_{\text{rip}0}=25.59\%$ 和 $T_{\text{avg}0}=8.41\text{N}\cdot\text{m}$ 。这样就确保了使用多目标优化算法的优化结果对于这三个输出变量均得到优化。

优化结果以 Pareto 3D 最优解集方式呈现,如图 6 所示,坐标轴分别表示齿槽转矩、平均转矩和转矩脉动。图中数据点分别表示不同输入变量的粒子,黑色代表不符合约束条件的粒子,红色代表符合约束条件的粒子。三角形面代表 Pareto 前沿, Pareto 最优解集位于 Pareto 前沿上,得到符合优化要求的解集一共有 18 个解,具体结果如表 2 所示。

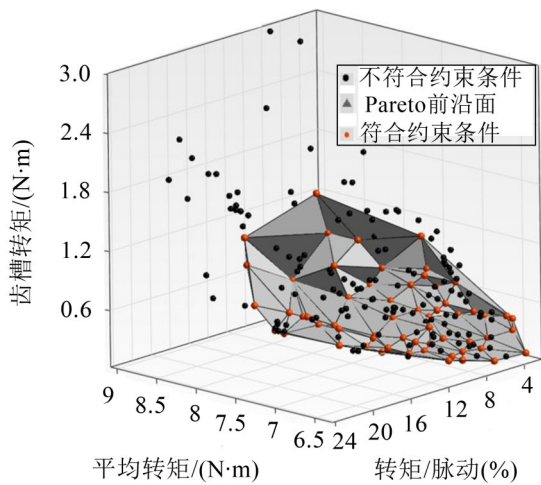


图 6 Pareto 3D 最优解集

表 2 Pareto 最优解集

序号	齿槽转矩/(N·m)	转矩脉动/(%)	平均转矩/(N·m)
1	0.96	10.35	8.48
2	0.41	11.29	8.44
3	1.18	10.0	9.0
...	...	...	...
16	1.07	4.47	8.69
17	1.16	5.32	8.73
18	0.71	9.78	8.18

### 2.3 基于 TOPSIS 法选取全局最优解

为了从 Pareto 最优解集中更客观地选取全局最优解,使用优劣解距离法(TOPSIS)对 Pareto 解集进行相对优劣评价。TOPSIS 法是一种客观高效的多目标决策分析方法,具体算法流程如下:

(1) 存在  $n$  个数据对象,  $m$  个评价指标时,如下式(13)所示,每个指标以矩阵的形式呈现。

$$X_j = [x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{nj}]^T, (j = 1, 2, \dots) \quad (13)$$

则初始矩阵为  $X=[X_1, X_2, \dots, X_j]$ 。

(2) 对评价指标趋势进行正向化处理,一般采用

倒数法:  $x_{ij}' = 1/x_{ij} (x_{ij} > 0)$

(3) 对数据进行归一化处理,一般采用平方和归一化,每个指标值消除量纲之后如式(14)所示。

$$Z_j = [z_{1j}, z_{2j}, \dots, z_{nj}]^T, (j = 1, 2, \dots, m)$$

$$z_{ij} = x'_{ij} / \sqrt{\sum_{i=1}^n (x'_{ij})^2}, (i = 1, 2, \dots, n) \quad (14)$$

(4) 求解正负理想向量  $z^+$ 、 $z^-$  如式(15)所示。

$$z^+ = [z_1^+, z_2^+, \dots, z_m^+] \quad z^- = [z_1^-, z_2^-, \dots, z_m^-]$$

$$z_j^+ = \max \{z_{1j}, z_{2j}, \dots, z_{nj}\}, (j = 1, 2, \dots, m)$$

$$z_j^- = \min \{z_{1j}, z_{2j}, \dots, z_{nj}\}, (j = 1, 2, \dots, m) \quad (15)$$

(5) 如式(16)所示,计算正负理想解距离。

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (z_j^+ - z_{ij})^2} \quad D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (z_j^- - z_{ij})^2} \quad (16)$$

(6) 根据正负理想解距离计算相对接近度如式(17)所示,相对接近度  $C_i$  数值越大则表明评价结果越好。

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-}, (0 < C_i < 1) \quad (17)$$

根据以上流程,对表 2 中的最优解集进行 TOPSIS 优化,以全局最优解为目标对象,评价指标分别为齿槽转矩、转矩脉动和平均转矩。通过对表 2 中数据正向化和归一化处理,将齿槽转矩、转矩脉动和平均转矩的最大值和最小值作为正负理想解,如表 3 所示。

表 3 正负理想解

评价指标	正理想解 $z^+$	负理想解 $z^-$
齿槽转矩	0.548	0.049
转矩脉动	0.435	0.121
平均转矩	0.251	0.222

根据正负理想解计算可得正负理想解距离和相对接近度如表 4 所示。

表 4 TOPSIS 评价计算结果

序号	正理想解距离 $D^+$	负理想解距离 $D^-$	相对接近度 $C$	排序结果
1	0.444	0.172	0.279	12
2	0.311	0.499	0.616	1
3	0.562	0.041	0.067	18
...	...	...	...	...
16	0.491	0.197	0.286	11
17	0.528	0.145	0.216	15
18	0.383	0.253	0.397	5

由表 4 排序结果可知,应选定第 2 个解为全局最优解,从而确定最合理的转子极靴宽度、磁极偏心距和气隙长度。遗传算法和 TOPSIS 法优化前后电机

参数和各个转矩对比如表5,可以看出电机齿槽转矩得到了有效抑制,并且有效削弱了电机转矩脉动,提升了电机平均转矩,对减少电机的振动噪声和提高电机出力均有改善。

表5 算法优化前后数据对比

对象	优化前	优化后
极靴宽度 $l/\text{mm}$	0.35	3
磁极偏心距 $H/\text{mm}$	0	10.77
气隙长度 $b/\text{mm}$	0.5	0.35
齿槽转矩 $(\text{N}\cdot\text{m})$	1.50	0.41
转矩脉动 $(\%)$	25.59	11.29
平均转矩 $(\text{N}\cdot\text{m})$	8.14	8.44

为了检验该优化方法不仅可以抑制励磁电流为12A时电机的齿槽转矩,还可以抑制其他励磁电流条件下的齿槽转矩。分别对优化后电机不同励磁电流条件下齿槽转矩进行计算,可以得到优化后齿槽转矩波形如图7所示,优化前后齿槽转矩在不同励磁电流条件下峰值对比如图8所示。

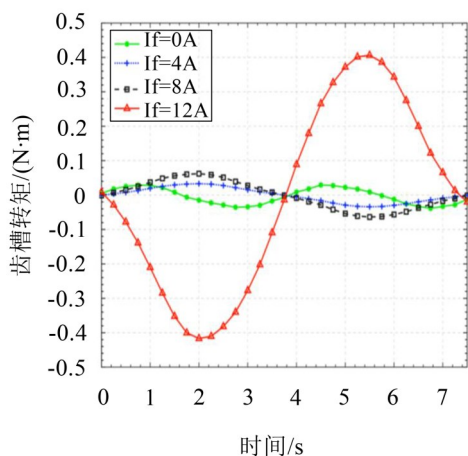


图7 优化后电机在不同励磁电流下齿槽转矩

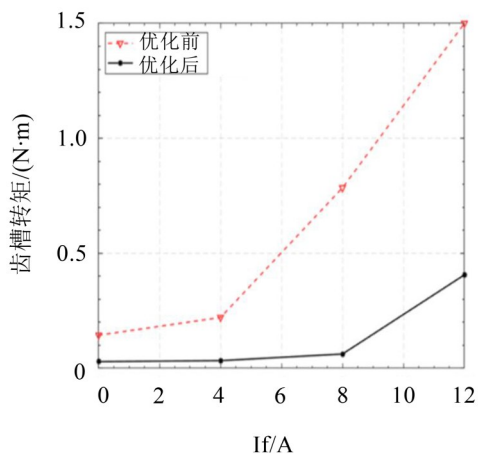


图8 优化前后不同励磁电流时齿槽转矩峰值

由图7和图8可以看出,采用算法优化后,在不同励磁电流条件下,电机的齿槽转矩得到了显著抑

制。并且在励磁电流较大时抑制效果更加明显,在励磁电流为8A时,电机齿槽转矩从 $0.79 \text{ N}\cdot\text{m}$ 下降至 $0.061 \text{ N}\cdot\text{m}$ ,下降了近92%。在励磁电流为12A时,齿槽转矩从 $1.5 \text{ N}\cdot\text{m}$ 下降至 $0.41 \text{ N}\cdot\text{m}$ ,下降了近73%。验证了采用遗传算法和TOPSIS法对电机参数进行优化的合理性。

### 3 优化前后电机其他性能对比

通过采用遗传算法和TOPSIS法对电机在励磁电流为12A时的极靴宽度、磁极偏心距和气隙长度进行优化,优化前后电机磁力线分布如图9所示。在优化前后,电机气隙磁密、气隙磁密谐波分布、空载反电势、输出转矩对比如图10至图13所示。

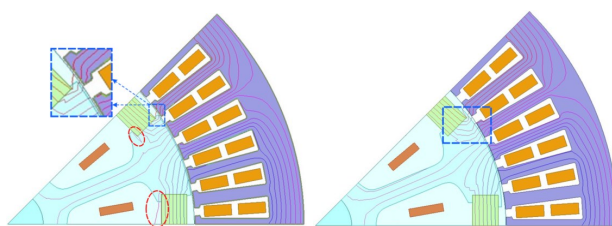


图9 优化前后电机磁力线对比

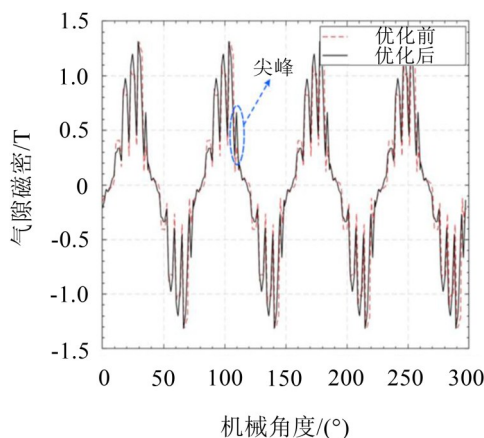


图10 优化前后电机气隙磁密对比

由图8可以看出,优化之前电机磁力线具有部分漏磁,由于转子极靴宽度不够,导致电机在转子磁极磁力线路径较长。优化之后电机磁力线更加合理,避免了电机漏磁现象。

如图10所示,选择合适的极靴宽度和磁极偏心距,使得气隙磁密幅值略微上升,增大了电机平均转矩。优化之后气隙磁密出现一个尖峰,这是由于极靴宽度和磁极偏心距增大而引起的,这使得气隙磁密波形趋于正弦波,从而减少气隙磁密畸变,改善电机性能。对优化前后气隙磁密进行傅里叶分解可以得到各阶次谐波对比,如图11所示,发现气隙磁密基波幅值从原来 $0.84 \text{ T}$ 上升至 $0.87 \text{ T}$ ,磁密基波幅值的上升提高了电机平均转矩,有利于电机出力。除



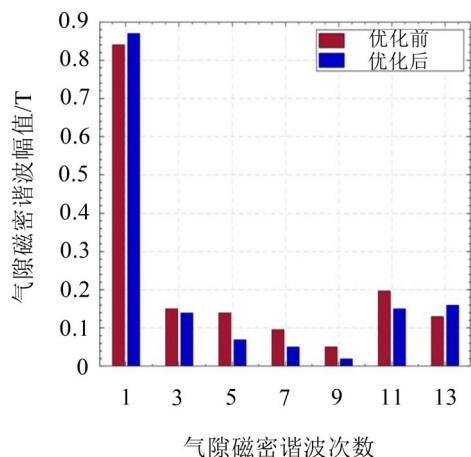


图11 优化前后电机气隙磁密谐波对比

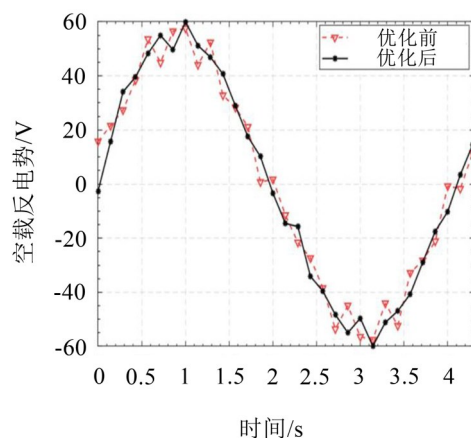


图12 优化前后电机空载反电势对比

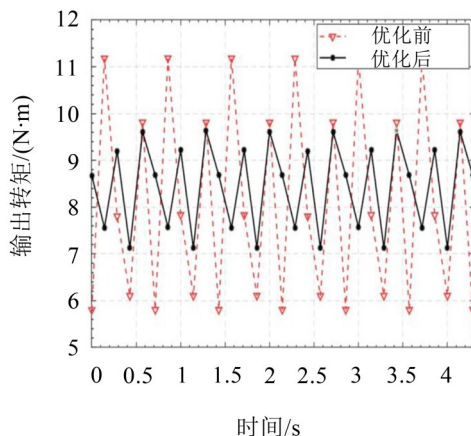


图13 优化前后电机输出转矩对比

了13次谐波略微上升以外,剩余的3、5、7、9、11次谐波均不同程度下降,其中5、7、9次谐波下降明显,这是电机齿槽转矩降低从而减小电机振动噪声的主要原因。

由图12可以看出,优化后电机空载反电势波形毛刺减少,波形更趋于正弦波,有利于减小电机转矩脉动。由图13可以看出,优化后电机转矩脉动明显降低,从25.59%降低至11.29%,大约降低了55.9%。优化后电机平均转矩得到了提升,从8.14

N·m提高至8.44 N·m。

## 4 结语

本文以一台2.5 kW TMS-HESM作为研究对象,采用遗传算法和TOPSIS法对电机极靴宽度、磁极偏心距和气隙长度进行优化,可以得到以下结论:

(1) 使用遗传算法和TOPSIS法进行多目标优化,解决了随着励磁电流增大导致电机齿槽转矩剧增的问题,有效削弱不同励磁电流条件下电机的齿槽转矩。在励磁电流较大时更为明显,励磁电流为12 A时,齿槽转矩从1.5 N·m下降至0.41 N·m,下降了接近73%。

(2) 针对电机存在多个输入和输出的多目标优化问题,通过遗传算法和TOPSIS法结合,可以高效客观选出全局最优解。

(3) 采用遗传算法和TOPSIS法对电机极靴宽度、磁极偏心距和气隙长度进行优化。在削弱齿槽转矩的同时,电机磁力线、气隙磁密、转矩脉动和平均转矩等其他性能也得到了改善,有利于减小电机振动噪声和提高电机出力。

### 参考文献:

- [1] FAN Y, QU G Y, TAN C. Design and analysis of a new five-phase dual-stator consequent-pole brushless hybrid excitation machine[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2019, 55(1): 1-10.
- [2] AHN H, PARK H, KIM C. A review of state-of-the-art techniques for PMSM parameter identification [J]. Journal of Electrical Engineering and Technology, 2020, 15(3): 1177-1187.
- [3] 张卓然,王东,花为. 混合励磁电机结构原理、设计与运行控制技术综述及展望[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(24): 7834-7850+8221.
- [4] HE M, XU W, ZHU J, et al. A novel hybrid excited doubly salient machine with asymmetric stator poles[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(5): 4723-4732.
- [5] 吴战,单文桃,刘意,等. 永磁同步电主轴电机有限元分析和参数优化[J]. 噪声与振动控制, 2020, 40(3): 38-42.
- [6] 蒋迪元,单文桃,潘玉成. 转子辅助槽对高速电主轴齿槽转矩的影响机理研究[J]. 噪声与振动控制, 2021, 41(1): 37-40+65.
- [7] 邢泽智,王秀和,赵文良. 基于不同极弧系数组合分段倾斜磁极的表贴式永磁同步电机齿槽转矩削弱措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(16): 5737-5748.
- [8] 石松宁,王大志. 削弱永磁驱动器齿槽转矩的斜极优化方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(22): 27-32.

(下转第193页)