

# 基于时空二维电磁力谐波抑制的转子开槽优化设计\*

王博<sup>1</sup> 王梦龙<sup>1</sup> 胡溧<sup>1</sup> 袁爽<sup>2</sup>

(1. 武汉科技大学, 武汉 430065; 2. 博格华纳汽车零部件(武汉)有限公司工程中心, 武汉 430100)

**【摘要】**为削弱车用同步电机振动噪声,提出了一种组合型转子开槽设计方案及电磁噪声正向优化设计方法。首先,探究了电磁振动噪声产生的机理,基于麦克斯韦张量法和有限元法研究了径向电磁力波时、空分布特性,确定了引起电磁噪声的主要电磁力谐波成分;其次,提出了一种组合型转子开槽改进设计方案,并结合最佳预测元模型和强度帕累托进化算法确定了开槽方案的结构参数最优解;最后,建立了电机电磁仿真模型,并对其线反电动势、齿槽转矩、输出转矩等进行对比评估。结果表明,转子开槽设计可有效抑制空间0阶12f电磁力谐波幅值、改善反电势波形、降低齿槽转矩和转矩脉动,从而降低振动噪声,较原始样机0阶12f电磁力谐波幅值削弱了81.51%,转矩脉动下降了44.98%。

**关键词:**电磁噪声 最佳预测元模型 灵敏度 强度帕累托进化算法 多目标优化

**中图分类号:**TM351 **文献标志码:**A **DOI:** 10.19620/j.cnki.1000-3703.20230955

## Rotor Slot Optimization Design Based on Spatiotemporal Two-Dimensional Electromagnetic Force Harmonic Suppression

Wang Bo<sup>1</sup>, Wang Menglong<sup>1</sup>, Hu Li<sup>1</sup>, Yuan Shuang<sup>2</sup>

(1. Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065; 2. Engineering Center of Borgwarner Auto Parts(Wuhan) Co., Ltd., Wuhan 430100)

**【Abstract】**To weaken the vibration and noise of automotive synchronous motors, this paper proposes a combined rotor slotting design scheme and electromagnetic noise forward optimization design method. Firstly, the mechanism of electromagnetic vibration noise is explored, then based on Maxwell tensor method and finite element method, the time-space distribution characteristics of radial electromagnetic force wave are studied, and the main electromagnetic force harmonic components causing electromagnetic noise are determined. Secondly, an improved design scheme of combined rotor slotting is proposed, and the optimal solution of structural parameters of slotting scheme is determined by combining the optimal prediction meta-model and strength Pareto evolutionary algorithm. Finally, the electromagnetic simulation model of the motor is established, and its line back electromotive force, cogging torque and output torque are compared and evaluated. The results show that the rotor slotting design can effectively suppress the spatial 0-order 12f electromagnetic force harmonic amplitude, improve the back EMF waveform, reduce the cogging torque and torque ripple, and thus reduce the vibration noise. Compared with the original prototype, the harmonic amplitude of the 0-order 12f electromagnetic force is weakened by 81.51%, the torque ripple is reduced by 44.98%.

**Key words:** Electromagnetic noise, Optimal predictive metamodel, Sensitivity, Strength pareto evolutionary algorithm, Multi-objective optimization

**【引用格式】**王博,王梦龙,胡溧,等.基于时空二维电磁力谐波抑制的转子开槽优化设计[J].汽车技术,2025(1):48-56.

WANG B, WANG M L, HU L, et al. Rotor Slot Optimization Design Based on Spatiotemporal Two-Dimensional Electromagnetic Force Harmonic Suppression[J]. Automobile Technology, 2025(1): 48-56.

## 1 前言

近年来,永磁同步电机因具有较高的转矩、功率密

度和效率,以及较好的弱磁调速能力而在电动汽车领域应用较为广泛。同时,电磁振动噪声已经成为新能源汽车NVH领域的共性痛点问题。因此,新能源汽车驱动

\*基金项目:国家自然科学基金(52375260)。

通信作者:王梦龙(1996—),男,硕士,研究方向为电驱动总成NVH仿真开发、测试及减振降噪,1679909417@qq.com。

电机振动噪声研究对提高车辆的驾驶舒适性和安全性具有重要价值。

永磁同步电机振动噪声受电机定子结构动力特性和径向电磁力波的综合影响。Sang-Ho Lee<sup>[1]</sup>等为减小电机中机械激励对其振动噪声的影响,在结构设计阶段考虑电机结构动力特性,通过增强定子刚度提高共振点频率实现了有效的避振;王宇<sup>[2]</sup>等分析了不同定子槽口宽度和磁体圆角半径对径向和切向电磁力的影响,并通过合理减小定子槽宽和磁铁圆角有效降低了电机电磁噪声;左曙光<sup>[3]</sup>等建立了径向电磁力波的解析模型,以径向力波能量和径向力波均值为目标函数,通过优化定子气隙长度和定子槽中心宽度,有效削弱了径向电磁力波;王群京<sup>[4]</sup>等使用基于响应面模型的遗传算法,通过优化电机定子槽型参数,有效地抑制了电机振动噪声;Ishikawa T<sup>[5]</sup>等人基于响应面法,以振动加速度、平均转矩和转矩涟漪为目标,对永磁体的形状和位置参数进行优化,有效降低了转矩涟漪和结构振动。

综上所述,优化电机结构是减小电磁振动噪声的主要方法。本文提出一种组合型转子开槽改进设计方案,并结合最佳预测元模型和强度帕累托进化算法确定开槽方案的结构参数最优解;最后,建立电机电磁仿真模型,并分别对其线反电动势、齿槽转矩、输出转矩等进行对比评估。

## 2 电磁振动噪声产生机理分析

电磁噪声主要由电机内部的电磁力引起,其中定子受到的电磁力通常可分解为径向电磁力和切向电磁力。径向电磁力沿定子齿传递到轭部,引起定子轭部发生径向形变,是引起电磁噪声的主要原因。

径向电磁力波是作用在定子齿上的磁力,其方向朝向定子的中心。忽略切向磁通密度的影响,作用在定子齿表面上的径向力的表达式为<sup>[6]</sup>:

$$F_r(\theta, t) = \frac{b_r^2(\theta, t) - b_{ts}^2(\theta, t)}{2\mu_0} \approx \frac{b_r^2(\theta, t)}{2\mu_0} \quad (1)$$

式中: $b_r(q, t)$ 为径向气隙磁通密度, $b_{ts}(q, t)$ 为切向气隙磁通密度, $\mu_0$ 为空气磁导率, $q$ 为空间机械角度, $t$ 为时间。

空载工况下,气隙磁动势主要由转子侧永磁体产生的转子磁动势组成,转子侧永磁体产生的转子磁动势可表示为:

$$f_{PM}(\theta, t) = \sum_u F_u \cos(u \frac{\omega_1}{p} t - u\theta) \quad (2)$$

式中: $\omega_1$ 为转动频率, $F_u$ 为谐波为 $u$ 次的谐波幅值, $p$ 为极对数。

其中, $u$ 满足:

$$u = (2r + 1)p \quad (3)$$

式中: $r$ 为正整数, $r=0, 1, 2, 3$ 。

当不考虑铁芯磁阻饱和时,可认为气隙磁通密度是气隙磁导 $l(q, t)$ 和气隙磁势 $f(q, t)$ 的乘积。其中,本文的研究对象属于定子开槽,转子表面光滑,故在该种情况下,气隙磁导可表示为:

$$\lambda(\theta, t) = \mu_0 \left[ \frac{\bar{\Lambda}_0}{\delta} + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{\bar{\Lambda}_n}{\delta} \cos nz_0\theta \right] \quad (4)$$

式中: $\bar{\Lambda}_0$ 为恒定磁导分量, $\bar{\Lambda}_n$ 为定子开槽/转子光滑时 $n$ 次谐波比磁导, $n$ 为正整数, $z_0$ 为定子槽数, $\delta$ 为气隙长度。

则空载时的气隙磁通密度可表示为:

$$b_1(\theta, t) = f_{PM}(\theta, t)\lambda(\theta, t) = \sum_u B_u \bar{\Lambda}_0 \cos(u \frac{\omega_1}{p} t - u\theta) + \sum_u \sum_k (-1)^{k+1} \frac{1}{2} B_u \bar{\Lambda}_n \cos \left[ u \frac{\omega_1}{p} t - (u \pm nz_0)\theta \right] \quad (5)$$

式中: $B_u$ 为转子的第 $u$ 次径向谐波幅值, $k$ 为常数。

负载工况下,定子绕组通入三相正弦电流,同步电机的气隙磁场成分改变,除了转子永磁体反应磁场外,还增加了定子绕组电流所产生的电枢反应磁场,根据电机学原理可知,电枢反应磁场为:

$$b_2(\theta, t) = \sum_v B_v \cos \left[ \omega_1 t - v\theta - \left( \varphi + \frac{\pi}{2} \right) \right] \quad (6)$$

式中: $B_v$ 为定子电枢反应磁场的第 $v$ 次径向谐波幅值, $\varphi$ 为定子绕组电流的相位。

其中,考虑整数槽定子绕组时,定子绕组谐波次数为:

$$v = (6k + 1)p \quad (7)$$

式中: $k$ 为正整数, $k=0, \pm 1, \pm 2, \pm 3$ 。

此时,总的气隙磁场为空载气隙磁场 $b_1(q, t)$ 与负载气隙磁场 $b_2(q, t)$ 的和,将计算所得总的气隙磁场代入式(1)即可得到永磁同步电机径向电磁力的解析模型。其中,转子磁场谐波与定子磁场谐波、定子一阶、二阶齿谐波相互作用会产生空间0阶电磁力波,因其幅值较大而引起严重的电磁噪声。

## 3 转子结构改进设计方案

### 3.1 样机原始参数及电磁仿真

研究对象为8极48槽内置式永磁同步电机,转子为V型拓扑结构。其主要工作参数及部分结构参数如表1所示。电机模型横截面如图1所示,其中, $R_{os}$ 、 $R_{is}$ 、 $R_{ir}$ 分别为定、转子外径和转子内径。

表1 电机主要工作参数及部分结构参数

参数	数值
定/转子外径/mm	190/123.8
定/转子内径/mm	125/60
极数/槽数/个	8/48
绕组层数/层	2
铁芯长度/mm	100
额定转速/r·min <sup>-1</sup>	3 000

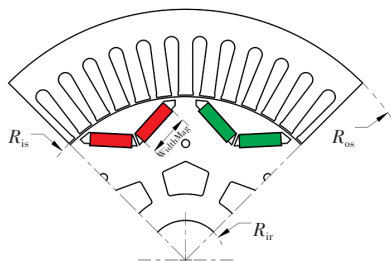


图1 电机模型横截面

基于有限元法在 Maxwell 中建立其电机的电磁仿真模型,通过仿真求解其径向气隙磁通密度,并利用式(1)计算其径向电磁力密度。计算得到的3D(时间-空间-电磁力密度)曲线如图2所示。

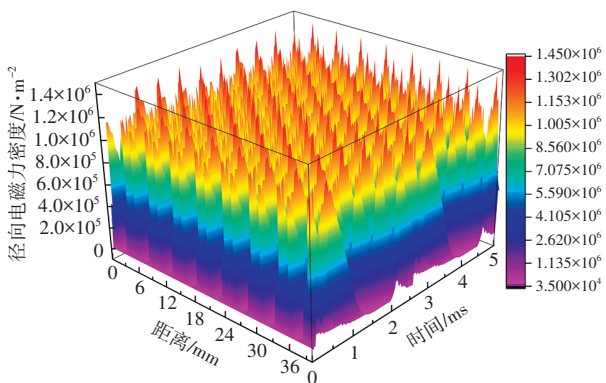


图2 3D(时间-空间-径向电磁力)密度曲线

对径向电磁力波密度进行二维傅里叶变换,其原理如式(8)<sup>[7]</sup>,所得结果如图3所示。

$$F_r(r, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} F_r(\theta, t) e^{j2\pi(r\theta + ft)} d\theta dt \quad (8)$$

式中: $r$ 为电磁力的空间阶数; $f$ 为电磁力的基频,其大小为转频与极对数的乘积。

从图3中可以看出,8阶电磁力波在 $2f$ 频率处有较大的幅值,但对于中小型电机而言,可以不考虑该频段对电机电磁噪声的影响,且工程中通常仅考虑空间前4阶的电磁力波。

图4所示为空间0阶电磁力谐波时间频次分布,可以看出,较突出电流谐波有 $6f$ 、 $12f$ 和 $24f$ ,它们分别是引起电机24阶、48阶、96阶噪声的主要原因,这与理论分析结果相一致。

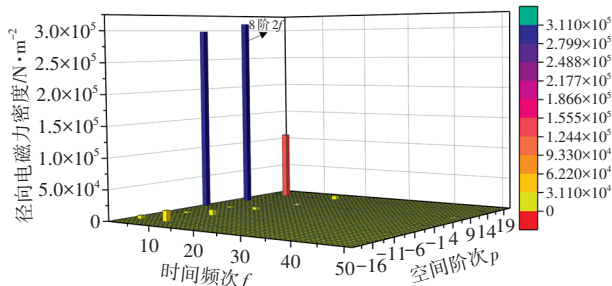


图3 径向电磁力密度二维傅里叶变换结果

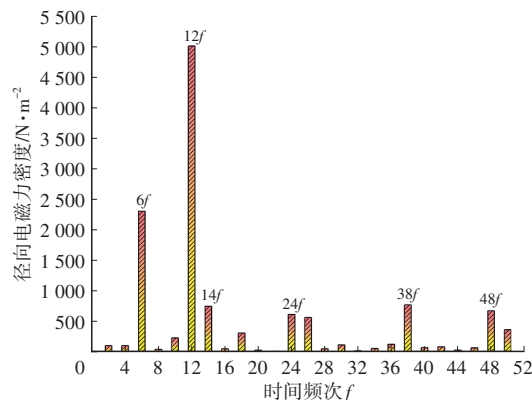


图4 空间0阶电磁力的时间谐波频次分布

### 3.2 定子模态分析

基于有限元法建立定子等效结构模型并仿真计算其自由模态。表2给出了定子主要低阶模态振型及频率,空间0阶电磁力频率主要包括 $2f$ (400 Hz)、 $6f$ (1 200 Hz)、 $12f$ (2 400 Hz)等偶数倍频。定子各阶次固有频率和主要的电磁力频率均有较大差距,因此不会发生共振<sup>[8]</sup>。

表2 定子各阶次模态频率及振型

阶次	2	3	4	0
频率/Hz	570.14	1 496.50	2 446.70	6 077.20
振型				

### 3.3 转子结构改进设计

针对电磁力谐波幅值的削弱和转矩脉动的抑制,提出了一种组合型转子开槽设计方案,即一对主槽放置在V字磁钢槽表面的磁桥位置,另一对辅槽放置在靠近磁极中心的位置,如图5所示。

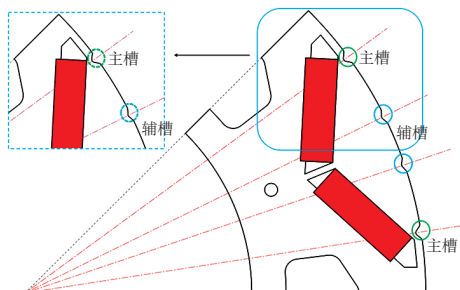


图5 转子开槽方案

### 4 转子开槽参数优化

基于 Maxwell 和 optiSLang 软件联合构建了一种基于时、空二维电磁力谐波抑制的电机电磁噪声正向优化设计方法,其具体流程如图6所示。

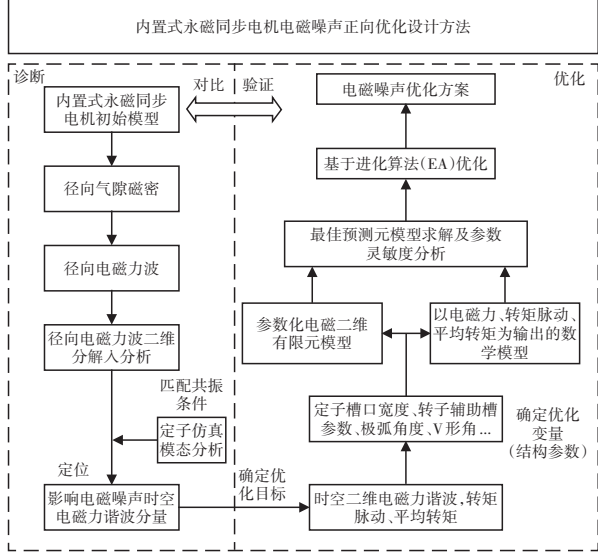


图6 电机电磁噪声正向优化设计流程

#### 4.1 确定优化变量和优化目标

针对上述所提方案分两步进行开槽结构参数寻优。组合型转子开槽参数如图7所示,其中,  $N_D$  为槽深,  $N_{CA}$  为槽口圆心角,  $N_A$  为槽口位置角。

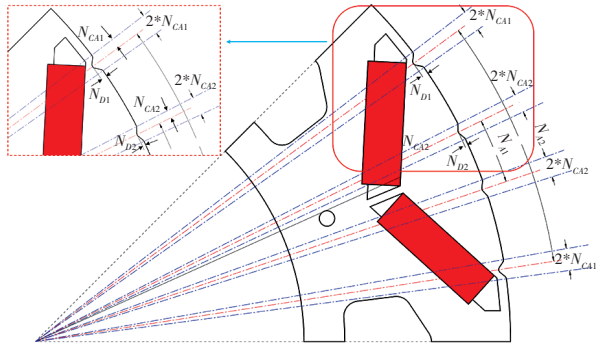


图7 转子开槽参数

根据理论解析和仿真结果可知,0阶6f和0阶12f电磁力谐波幅值较大,是引起电机24阶、48阶电磁噪声的主要激励源,故将其作为主要优化目标,转矩脉动是引起电机噪声的另一个原因,将其作为次级优化目标。转矩脉动  $T_{rip}$  为:

$$T_{rip} = \frac{T_{Max}(t) - T_{Min}(t)}{T_{avg}} \quad (9)$$

式中:  $T_{Max}(t)$ 、 $T_{Min}(t)$  分别为电磁转矩的最大值和最小值,  $T_{avg}$  为电磁转矩的平均值。

根据上述所确定的优化变量,优化目标和约束条件,建立多目标优化数学模型:

Function:

$$\begin{aligned} G(1) &= \min f_1(T_{rip}) \\ G(2) &= \min f_2(\text{Force}_{0p6f}) \\ G(3) &= \min f_3(\text{Force}_{0p12f}) \end{aligned}$$

$$\text{constrain: } T_{avg} \geq \text{目标值 } T_{PD} \quad (10)$$

s.t.

$$\begin{aligned} \min(N_A) &\leq N_A \leq \max(N_A) \\ \min(N_D) &\leq N_D \leq \max(N_D) \\ \min(N_{CA}) &\leq N_{CA} \leq \max(N_{CA}) \end{aligned}$$

#### 4.2 参数样本空间采样及样本点选取

首先进行主槽部分的结构参数优化,其变化范围需保证各结构参数之间不产生干涉,且满足转子强度要求。其具体参数初始值及变化范围如表3所示。

表3 主槽参数初始值及变化范围

变量	初始值	变化范围
槽深 $N_{D1}$ /mm	0.5	0~1.5
槽圆心角 $N_{CA1}$ /( $^\circ$ )	110	90~160
槽口角 $N_{A1}$ /( $^\circ$ )	16	0~20

采用改进拉丁超立方体取样法<sup>[9]</sup>(Advanced Latin Hypercube Sampling, ALHS)进行取样,完成变量样本点采样后,将样本点代入有限元软件中并计算对应的  $T_{avg}$ 、 $T_{rip}$ 、空间0阶6倍频电磁力波密度( $\text{Force}_{0p6f}$ )和空间0阶12倍频电磁力波密度( $\text{Force}_{0p12f}$ )。求解时间共5ms,步长为0.05ms,总计得到变量和目标值所构成的200组样本点数据,将所有样本点数据使用线型图进行表示,其结果如图8所示。

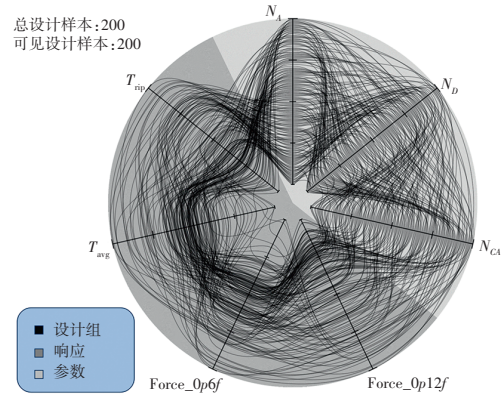


图8 样本点数据蛛网图

#### 4.3 参数灵敏度分析

灵敏度分析用以评价设计参数对系统或响应值的影响程度。此处引入灵敏度指数  $H(x_i)$ ,通过灵敏度分析用以确定对目标值影响较大的开槽结构参数  $H$ :

$$H(x_i) = \frac{V\left(\frac{\partial y}{\partial x_i}\right)}{V(y)} \quad (11)$$

式中:  $x_i$  和  $y$  分别为优化变量和优化目标;  $V(y)$  为输出值

的无条件方差; $E(y/x_i)$ 表示当 $x_i$ 为常数时, $y$ 输出的平均值; $V[E(y/x_i)]$ 为 $E(y/x_i)$ 的方差。

基于上述灵敏度分析理论,得到主槽各结构参数的灵敏度分析结果如图9所示。结果表明,槽口位置角 $N_{A1}$ 和槽深 $N_{D1}$ 是影响0阶12f电磁力谐波和转矩脉动 $T_{rip}$ 大小的主要参数。

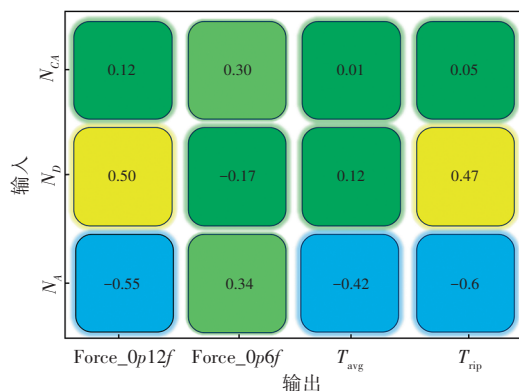
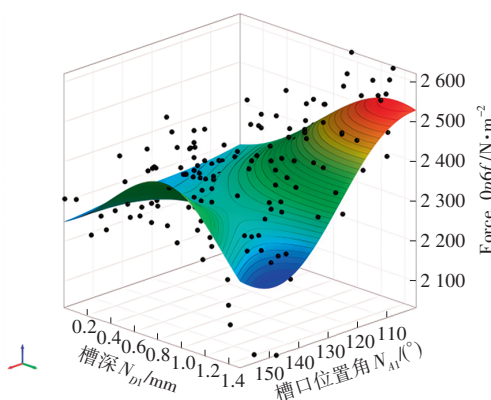


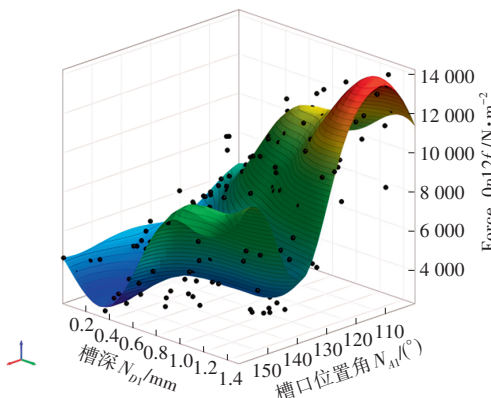
图9 输入与输出灵敏度关联系数矩阵

#### 4.4 最佳预测元模型求解

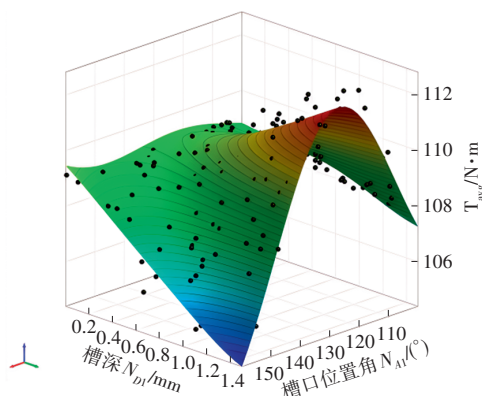
在此引入最佳预测元模型<sup>[10]</sup>(Metamodel of Optimal Prognosis, MOP),为每个目标函数建立高质量响应面,即最佳预测元模型,在此基础上,将其作为代理求解器以进行后续的优化计算。图10为主槽中4个目标函数与最佳参数子集所构成的响应面模型。



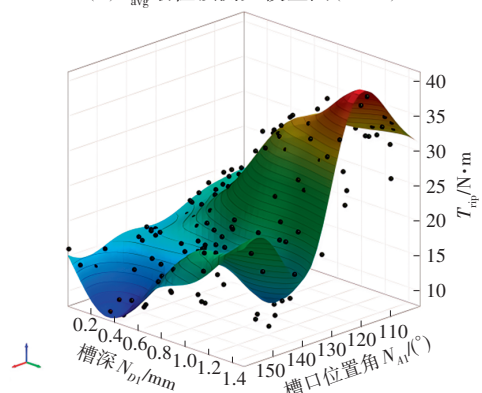
(a)Force\_0p6f最佳预测元模型图(MOP)



(b)Force\_0p12f最佳预测元模型图(MOP)



(c) $T_{avg}$ 最佳预测元模型图(MOP)



(d) $T_{rip}$ 最佳预测元模型图(MOP)

图10 目标函数与最佳参数子集的拟合模型

#### 4.5 拟合模型质量评价

为了对上述拟合模型质量进行评估,引入预测精度系数 $R^2$ , $R^2$ 为常见的判定系数(Coefficient of Determination, CoD),CoD可用于评估多项式回归模型的近似质量,其定义为由近似解释的相对变化量<sup>[11]</sup>。拟合结果表明,各响应值MOP的拟合方法为各向同性克里格近似(Isotropic Kriging Approximation, IKA),拟合结果为隐式拟合。各个模型预测精度系数 $R^2$ 如表4所示,各响应值所得MOP的预测精度系数均在90%以上,满足设计要求,可以作为代理求解器进行后续的优化计算。

表4 MOP模型拟合信息表

参数	Force_0p6f	Force_0p12f	$T_{avg}/N \cdot m$	$T_{rip}/N \cdot m$
$R^2$	0.91	0.98	0.99	0.98

#### 4.6 基于SPEA2算法的多目标优化

强度帕累托进化算法(Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2, SPEA2)最早是由Zitzler<sup>[12]</sup>等提出的一种多目标优化算法。本文结合MOP模型和SPEA2算法以0p6f和0p12f电磁力谐波幅值及转矩脉动 $T_{rip}$ 为优化目标,电磁输出转矩平均值 $T_{avg}$ 为约束条件,对开槽方案下的槽参数进行寻优,优化流程如图11所示。优化算法部分设定为种群大小为10,最大进化代数1000,档案集

的大小为10,模拟二进制的交叉概率0.5,分布因子为2,线性变异概率0.33,标准偏差率0.1。

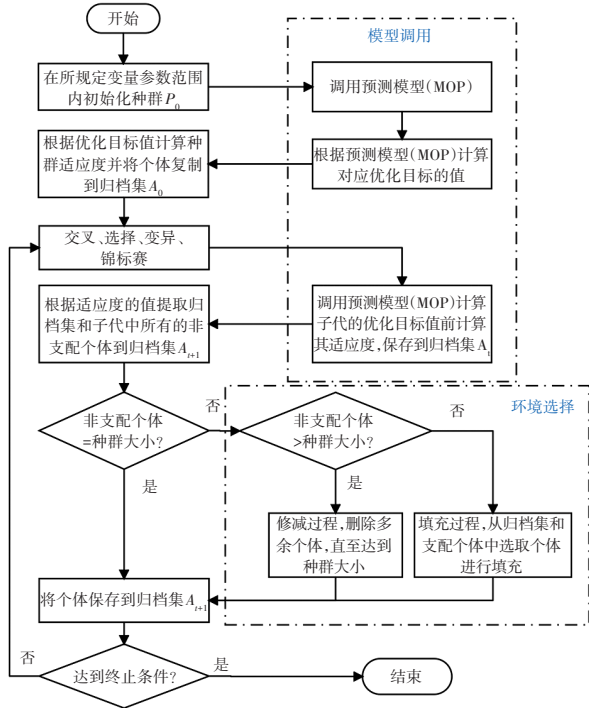


图11 SPEA2优化流程

优化结果如图12所示,图中的每个点都代表了一组设计方案,各目标之间是非支配的,即所有优化目标无法同时满足是最优解的条件。其中符合设计要求的Pareto Front解集共计238个。本文选取第9 916组设计方案,所对应的各优化变量的设计参数为槽深 $N_{D1}=0.58$  mm,槽口圆心角 $N_{CA1}=16.883$ °,槽口位置角 $N_{A1}=138.23$ °。

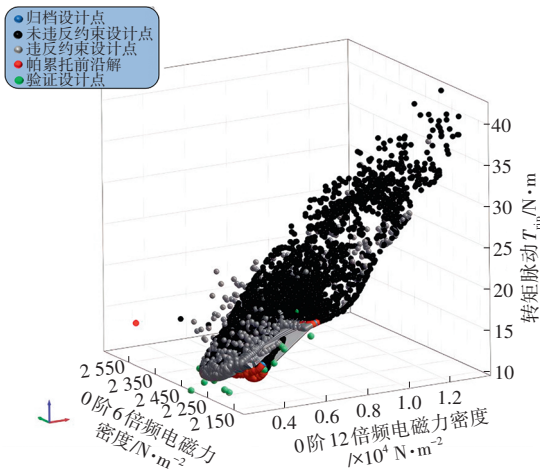


图12 Pareto解集

4.7 有限元仿真验证

基于Maxwell软件建立所选设计方案的电磁仿真模型,分别对各响应值进行求解,并与基于MOP模型的求解结果进行比较,如表5所示。计算结果的相对误差均小于5%,故以MOP模型为代理求解器利用SPEA2算法

进行多目标优化是可行的。

表5 优化结果和仿真结果对比

参数	基于MOP	基于Maxwell	误差/%
Force_0p6f/ $N \cdot m^{-2}$	2 362.42	2 425.61	2.6
Force_0p12f/ $N \cdot m^{-2}$	3 498.64	3 567.61	1.93
$T_{rip}/N \cdot m$	11.58	11.81	1.95
$T_{avg}/N \cdot m$	109.27	109.11	0.15

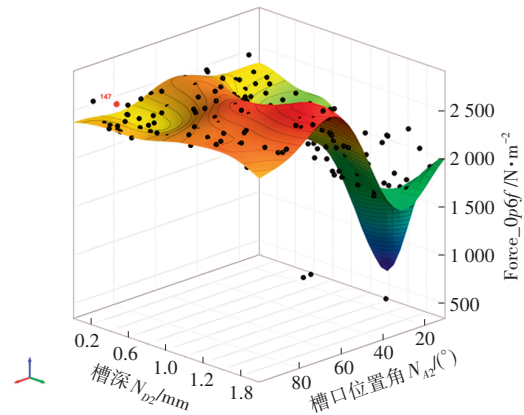
4.8 辅槽最优参数确定

辅槽在主槽最优解的基础上进行优化设计,其参数如表6所示,MOP模型如图13所示,MOP模型拟合信息如表7所示。可以看出,各响应值的拟合方法均为IKA,拟合结果为隐式拟合,预测精度均在90%以上,可以进行下一步优化计算。

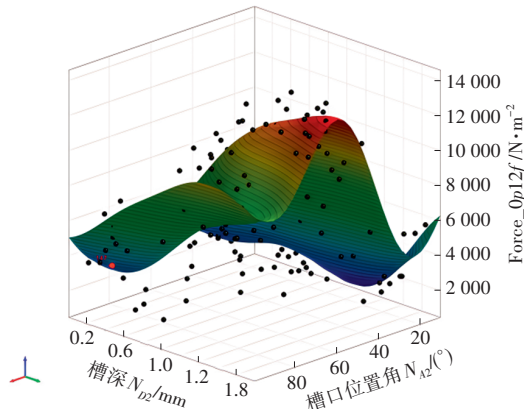
表6 辅槽参数初始值及变化范围

变量	初始值	变化范围
槽深 $N_{D2}/mm$	0.5	0~2
槽圆心角 $N_{CA2}/(^\circ)$	30	10~100
槽口角 $N_{A2}/(^\circ)$	8	0~20

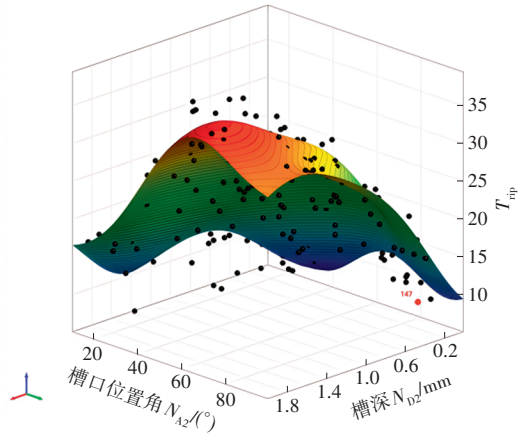
优化结果如图14所示,选取第229号方案作为辅槽的参数,各变量参数值为槽深 $N_{D2}=0.53$  mm、槽口圆心角 $N_{CA2}=4.96$ °、槽口位置角 $N_{A2}=28.65$ °。



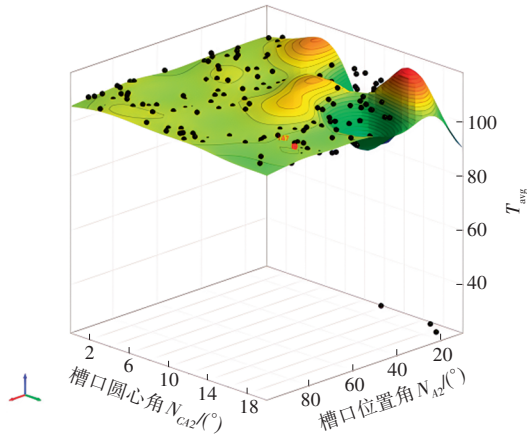
(a)Force\_0p6f最佳预测元模型图(MOP)



(b)Force\_0p12f最佳预测元模型图(MOP)



(c)  $T_{np}$ 最佳预测元模型图(MOP)



(d)  $T_{avg}$ 最佳预测元模型图(MOP)

图13 目标函数与最佳参数集的拟合模型

表7 MOP模型拟合信息表

参数	Force_0p6f/ $N \cdot m^{-2}$	Force_0p12f/ $N \cdot m^{-2}$	$T_{avg}/N \cdot m$	$T_{np}/N \cdot m$
$R^2$	0.98	0.98	0.98	0.98

- 归档设计点
- 未违反约束设计点
- 违反约束设计点
- 帕累托前沿解
- 验证设计点

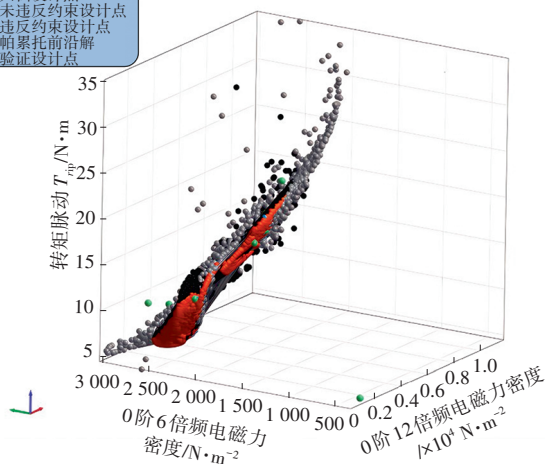


图14 Pareto解集

## 5 电磁性能对比与评估

### 5.1 径向电磁激振力

图15比较了所述方案和原始设计空间0阶电磁力

的时间谐波幅值大小。结果表明,转子开槽设计对电磁力波的影响存在一种“此消彼长”的现象,即在有效降低0p12f的同时,其他时间频次的电磁力谐波幅值会有小范围的增长,可知转子开槽设计仅针对电机的0p12f电磁力谐波具有抑制效果。

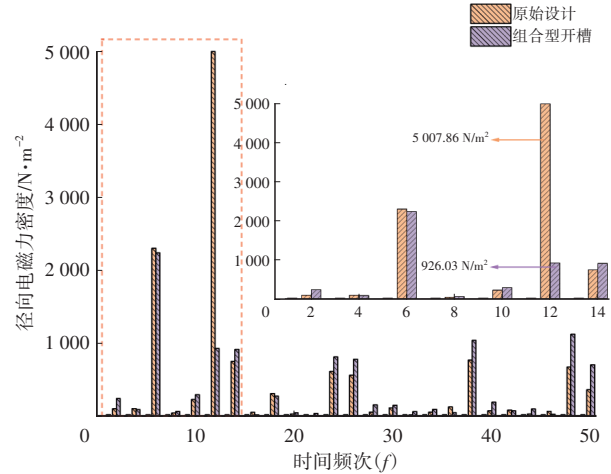


图15 空间0阶径向电磁力的时间谐波对比

表8给出了所述方案与原始设计在0p6f和0p12f电磁力谐波幅值的比较结果。从电磁力谐波幅值的变化可以看出,转子开槽设计有效降低了0p12f电磁力波,较原始方案0p12f电磁力谐波幅值降低了81.51%,即可有效降低电机的48阶电磁噪声。

表8 优化前后电磁力对比

方案	Force_0p6f/ $N \cdot m^{-2}$	Force_0p12f/ $N \cdot m^{-2}$
原始设计	2 303.24	5 007.86
组合型开槽	2 243.6	926.03
对比/%	-2.59	-81.51

### 5.2 线反电动势

对比了组合型开槽方案与原始方案在3 000 r/min下的定子绕组线反电动势的傅里叶分解结果,如图16所示。从基波幅值的变化来看,相比于原始设计,优化方案中基波幅值从242.18 V上升至245.64 V;从谐波幅值变化来看,一阶齿谐波分量(11次和13次)中的11次谐波被削弱。故组合型开槽方案可有效改善反电势波形,使其畸变率有所降低,电机的转矩密度得到提升,进而可有效降低转矩脉动。

### 5.3 齿槽转矩

齿槽转矩是永磁同步电机转矩脉动产生的主要因素,对空载和轻载工况下的输出转矩具有较大影响。图17对比了所述方案与原始样机的空载齿槽转矩波形。结果表明,所述开槽方案有效降低了齿槽转矩峰值,可改善转矩脉动。

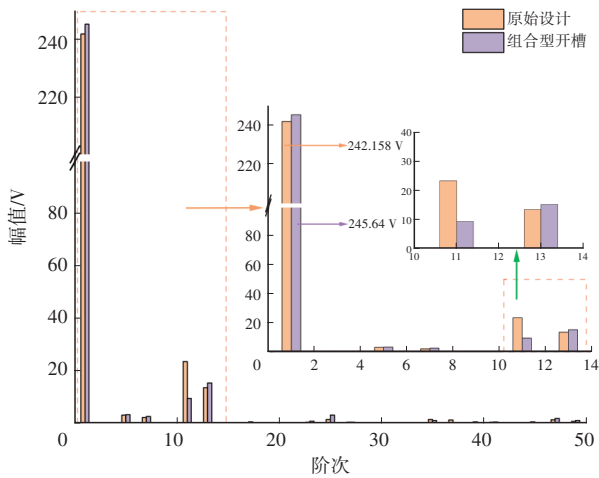


图16 定子绕组线反电动势傅里叶结果对比

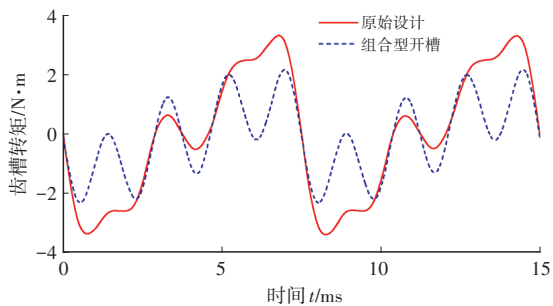


图17 齿槽转矩对比

### 5.4 输出转矩

图18比较了不同方案下电磁输出转矩的波形。表9对比了输出转矩的平均值和转矩脉动,从比较结果来看,所述方案在输出转矩基本不变的前提下有效地削弱了转矩脉动,较原始样机转矩脉动降低了44.98%,对电机的振动噪声具有一定的改善作用。

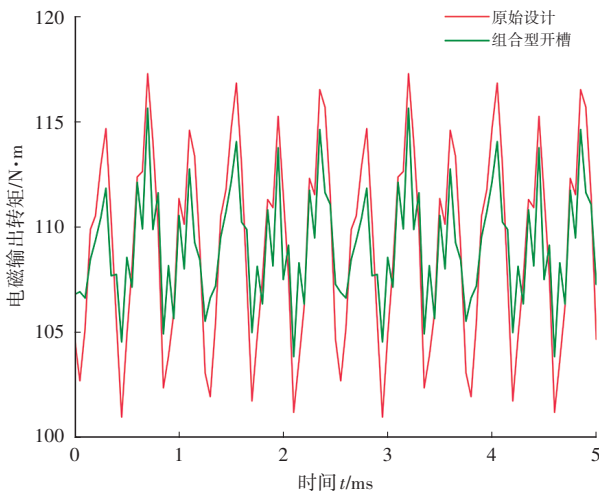


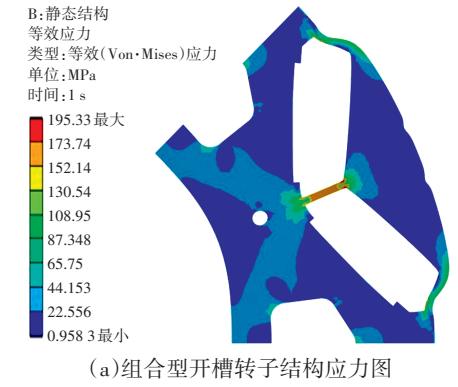
图18 电磁输出转矩比较

表9 输出转矩比较

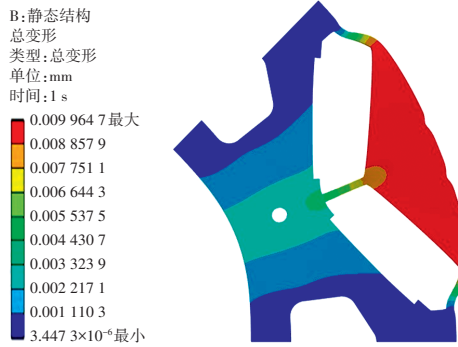
参数	原始设计	组合型开槽	对比
$T_{avg}$	109.24	108.56	
$T_{rip}$	0.163 4	0.089 9	-0.449 8

### 5.5 转子冲片强度校核

采用组合型开槽时,转子在12 000 r/min的应力和变形如图19所示。结果表明,最大应力集中在转子隔磁桥位置,最大值为195.33 MPa,远小于硅钢片的屈服强度450 MPa,故在旋转过程中不会发生塑性变形。转子结构最大变形量为0.01 mm,电机的气隙长度为1.2 mm,变形量远小于气隙长度,故该开槽转子结构满足设计强度要求。



(a)组合型开槽转子结构应力图



(b)组合型开槽转子结构形变图

图19 高速空载下转子应力与形变

## 6 结束语

本文以8极48槽电机为研究对象,提出了一种组合型转子开槽设计方案,并结合MOP模型和SPEA2算法对开槽参数寻优,最后对比评估了优化前、后的电机电磁性能,结果表明:转子开槽设计可有效抑制0p12f电磁力谐波,改善反电势波形,降低齿槽转矩和转矩脉动,从而减低振动噪声;提出的一种组合型转子开槽设计方案有效抑制了0p12f倍频电磁力谐波和转矩脉动,较原始样机0p12f削弱了81.51%;转矩脉动下降了44.98%;所构建的电机电磁噪声正向优化设计方法可以在保证输出转矩基本不变的前提下,通过结构参数寻优来降低时、空二维电磁力谐波幅值和转矩脉动,极大提高了优化设计效率,为低噪声电机设计和优化提供参考。

### 参考文献

[1] LEE S H, HONG J P, HWANG S M, et al. Optimal Design

- for Noise Reduction in Interior Permanent-magnet Motor[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2009, 45(6): 1954-1960.
- [2] 王宇, 郝志勇, 郑康, 等. 基于多向电磁力的永磁同步电机电磁噪声分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2020, 54(12): 2286-2293+2404.  
WANG Y, HAO Z Y, ZHENG K, et al. Analysis of Electromagnetic Noise of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Multi-Directional Electromagnetic Force[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2020, 54(12): 2286-2293+2404.
- [3] 左曙光, 马琮淦, 何融, 等. 车用永磁同步电机径向力波灵敏度分析和优化[J]. 振动. 测试与诊断, 2013, 33(3): 357-363+521.  
ZUO S G, MA C G, HE R, et al. Sensitivity Analysis and Optimization of Radial Force Wave of PMSM for Vehicle Using[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2013, 33(3): 357-363+521.
- [4] 王群京, 郑耀达, 刘先增. 基于结构参数优化的电机振动噪声的抑制研究[J]. 电气工程学报, 2023, 18(2): 16-25.  
WANG Q J, ZHENG Y D, LIU X Z. Research on Suppression of Motor Vibration and Noise Based on Structural Parameter Optimization[J]. Journal of Electrical Engineering, 2023, 18(2): 16-25.
- [5] ISHIKAWA T, YAMADA M, KURITA N. Design of Magnet Arrangement in Interior Permanent Magnet Synchronous Motor by Response Surface Methodology in Consideration of Torque and Vibration[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47(5): 1290-1293.
- [6] 陈永校, 诸自强, 应善成. 电机噪声的分析和控制[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1987.  
CHEN Y X, ZHU Z Q, YING S C. Analysis and Control of Motor Noise[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1987.
- [7] DENG W Z, ZUO S G. Comparative Study of Sideband Electromagnetic Force in Internal and External Rotor PMSMs with SVPWM Technique[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 66(2): 956-966.
- [8] 骆开军, 林曦鹏, 陈海生, 等. 电动车用永磁同步电机定子铁心固有频率研究[J]. 汽车技术, 2021(1): 31-36.  
LUO K J, LIN X P, CHEN H S, et al. Research on Natural Frequency of Stator Core of Permanent Magnet Synchronous Motor for Electric Vehicle[J]. Automobile Technology, 2021(1): 31-36.
- [9] 罗玉涛, 卢若皓. 基于结构参数分级优化的电机电磁噪声抑制[J]. 电工技术学报, 2021, 36(14): 2957-2970.  
LUO Y T, LU R H. Hierarchical Optimization of Structural Parameters for Motor Electromagnetic Noise Suppression[J]. Transactions of China Electrotechnical Society 2021, 36(14): 2957-2970.
- [10] MOST T, WILL J. Sensitivity Analysis Using the Metamodel of Optimal Prognosis[C]// Weimar, Germany: Weimar Optimization and Stochastic Days 8.0, 2011.
- [11] MONTGOMERY D C, RUNGER G C. Applied Statistics and Probability for Engineers[M]. New York: John Wiley & Sons, 2010.
- [12] ZITZLER E, LAUMANN M, THIELE L. SPEA2: Improving the Strength Pareto evolutionary Algorithm[J]. TIK report, 2001 .

(责任编辑 王 一)

修改稿收到日期为2023年11月1日。