

DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)10-0001-05

定子辅助槽对表贴式永磁同步电机齿槽转矩的影响

丁 锦, 姜文刚

(江苏科技大学 自动化学院, 江苏 镇江 212003)

摘要: 齿槽转矩是永磁同步电机(permanent magnet synchronous motors, PMSMs)固有的电磁现象,由永磁体与定子齿槽之间的磁共能变化引起,会导致转矩波动、振动噪声及控制精度下降等问题。为抑制齿槽转矩,以一台12槽8极的表贴式永磁同步电机为研究对象,基于有限元法建立电机电磁场计算模型,系统分析定子辅助槽的结构参数对齿槽转矩的影响规律。针对辅助槽的槽型形状、开槽数量、槽宽及槽深4个关键因素,分别开展单因素分析,明确各参数对齿槽转矩峰值的影响趋势与敏感度。在单因素分析基础上,采用拉丁超立方抽样算法构建多参数耦合的试验设计方案,通过有限元仿真获取样本数据,建立齿槽转矩响应面模型,进而实现全局优化。优化结果表明,当辅助槽采用梯形槽型、开槽数量为2、槽宽为1.18 mm、槽深为1.05 mm时,齿槽转矩抑制效果最优,峰值齿槽转矩下降71.6%,电机性能得到提高。

关键词: 表贴式永磁同步电机;辅助槽;有限元法;拉丁超立方抽样;齿槽转矩抑制

中图分类号: TP18;TM351

文献标志码: A

文章编号: 1003-7241(2026)10-0001-05

Effect of stator auxiliary groove on cogging torque of surface-mount permanent magnet synchronous motor

Ding Jin, Jiang Wengang

(School of Automation, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, Jiangsu, China)

Abstract: Cogging torque is an inherent electromagnetic phenomenon of permanent magnet synchronous motors (PMSMs), caused by the change in magnetic mutual energy between the permanent magnet and the stator cogging. It can lead to issues such as torque fluctuation, vibration noise, and reduced control accuracy. To suppress cogging torque, a surface-mounted 12-slot 8-pole PMSM was taken as the research object. Based on the finite element method, an electromagnetic field calculation model of the motor is established to systematically analyze the influence of the structural parameters of the stator auxiliary slots on cogging torque. Single-factor analysis is conducted for four key factors of the auxiliary slot shape, number of slots, slot width, and slot depth, to clarify the influence trend and sensitivity of each parameter on the peak value of cogging torque. Based on the single-factor analysis, a Latin hypercube sampling algorithm is used to construct a multi-parameter coupled experimental design scheme. Sample data are obtained through finite element simulation, and a cogging torque response surface model is established to achieve global optimization. The optimization results show that when the auxiliary slots are of trapezoidal shape, with 2 slots, a slot width of 1.18 mm, and a slot depth of 1.05 mm, the cogging torque suppression effect is optimal, with a 71.6% reduction in peak cogging torque, and the motor performance is improved.

Keywords: surface-mount permanent magnet synchronous motor; auxiliary groove; finite element method; Latin hypercubic sampling; tooth-slot torque suppression

齿槽转矩是永磁电机转子上齿槽间隙引起的转矩波动,导致电机输出转矩发生周期性变化,引起转矩脉动,造成定子之间的振动和噪声,会很大程度上影响电机的稳定性和平稳性。由于输出转矩的波动,部分电能被转化为不稳定的转矩,平均转矩值下降,效率下降。针对这一复杂问题,在复杂洋流干扰下水下机器人多电机协同容错控制方法研究这一基金课题下,本研究致力于解决电机运行中面临的关键问题,包括降低齿槽转矩、减少转矩脉动以

及机械振动噪声,来提高电机运行的可靠性,而齿槽转矩会很大程度影响转矩脉动和振动噪声,因此降低齿槽转矩是提高电机可靠性的关键问题。

目前已有许多学者对齿槽转矩的抑制方法进行研究。刘娜等^[1]、王伟等^[2]主要通过改变极弧系数来削弱齿槽转矩,但是优化效果并不突出;闫宏亮等^[3]、谷昭斌等^[4]、陶彩霞等^[5]、陈鑫等^[6]通过开辅助槽来降低齿槽转矩,效果较好,但都是针对内置式结构的永磁同步电机的研究,

收稿日期:2024-10-08;录用日期:2024-12-20

基金项目:国家自然科学基金(51977101)

作者简介:丁 锦(1999—),男,硕士研究生,研究方向为电机设计与优化。

通信作者:姜文刚(1973—),男,博士,教授,研究方向为伺服控制。

引用本文:丁锦,姜文刚. 定子辅助槽对表贴式永磁同步电机齿槽转矩的影响[J]. 自动化技术与应用, 2026, 45(10): 1-5. (Ding Jin, Jiang Wengang. Effect of stator auxiliary groove on cogging torque of surface-mount permanent magnet synchronous motor[J]. Techniques of Automation and Applications, 2026, 45(10): 1-5.)

通过定子辅助槽来对表贴式永磁同步电机的齿槽转矩进行削弱的方案研究较少。

本文将采用定子辅助槽,从槽型、开槽数量、槽宽、槽深四个方面进行优化,研究对表贴式永磁同步电机齿槽转矩削弱的影[7-10]。基于能量法剖析齿槽转矩,分析齿槽转矩数学表达式,以表贴式永磁同步电机为样机,在Ansys Maxwell软件下,建立电机模型[15-19],详细论述定子辅助槽的槽型、开槽数量、槽宽、槽深,四个方面对齿槽转矩的影响以及在其不同范围内齿槽转矩的变化趋势,采用拉丁超立方算法以槽宽和槽深同时为变量,以齿槽转矩和转矩脉动为优化目标进行优化,得到齿槽转矩抑制效果较好的辅助槽参数,仿真数据表明,定子辅助槽可以有效地抑制齿槽转矩,证明优化方案的合理性。

1 齿槽转矩数学模型

齿槽转矩的定义:齿槽转矩是由于定子和转子之间的磁阻变化而产生的转矩,在无通电情况下,电机磁场能量 W 主要取决于定子和转子的相对位置角 α ,齿槽转矩 T_{cog} 是磁场能量对相对位置角的负导数,即

$$T_{\text{cog}} = - \frac{\partial W}{\partial \alpha} \quad (1)$$

电机内存储磁能近似等于气隙中的磁能与永磁体磁能之和,即

$$W \approx W_{\text{airgap+PM}} = \frac{1}{2\mu_0} \int_V B^2 dV \quad (2)$$

式中, $W_{\text{airgap+PM}}$ 为电机气隙和永磁体存储的能量; V 为定子铁心内径和转子铁心外径之间的区域; μ_0 为真空磁导率。

假设永磁体磁导率等于空气,表贴式永磁同步电机气隙磁密为

$$B_{\delta} = B_r \frac{h_m}{h_m + \delta} \quad (3)$$

$$B(\theta, \alpha) = B_r(\theta) \frac{h_m(\theta)}{h_m(\theta) + \delta(\theta, \alpha)} \quad (4)$$

$$G(\theta, \alpha) = \frac{h_m(\theta)}{h_m(\theta) + \delta(\theta, \alpha)} \quad (5)$$

式中, $B_r(\theta)$, $h_m(\theta)$, $G(\theta, \alpha)$, $\delta(\theta, \alpha)$ 分别为永磁体剩磁,永磁体充磁方向长度,齿中心线与磁极中心线夹角 α 时的有效气隙长度,有效气隙长度沿圆周方向的分布。

将公式(4)代入式(2),得

$$W = \frac{1}{2\mu_0} \int_V B_r^2(\theta) \left[\frac{h_m(\theta)}{h_m(\theta) + \delta(\theta, \alpha)} \right]^2 dV \quad (6)$$

将式(6)和式(5)代入式(1),得

$$T_{\text{cog}} = - \frac{\partial \left[\frac{1}{2\mu_0} \int_V B_r^2(\theta) G^2(\theta, \alpha) dV \right]}{\partial \alpha} \quad (7)$$

式中, $B_r^2(\theta)$, $G^2(\theta, \alpha)$ 进行傅里叶展开就能得到齿槽转矩公式 $B_r^2(\theta)$ 傅里叶展开为

$$B_r^2(\theta) = B_{r0} + \sum_{n=1}^{\infty} B_{rn} \cos 2np\theta \quad (8)$$

$G^2(\theta, \alpha)$ 得傅里叶展开为

$$G^2(\theta, \alpha) = G_0 + \sum_{n=1}^{\infty} G_{zn} \cos nZ(\theta + \alpha) \quad (9)$$

式中, Z 为槽数。

无斜槽的齿槽转矩表达式为

当 $m \neq n$ 时,三角函数在一个周期内积分同时满足

$$\begin{aligned} \int_0^{2\pi} \cos m\theta \cos n\theta d\theta &= 0 \\ \int_0^{2\pi} \sin m\theta \cos n\theta d\theta &= 0 \\ \int_0^{2\pi} \sin m\theta \sin n\theta d\theta &= 0 \end{aligned} \quad (10)$$

将式(6)、(8)、(9)代入式(1),利用式(10),得

$$T_{\text{cog}}(\alpha) = \frac{\pi z L_a}{4\mu_0} (R_2^2 - R_1^2) \sum_{n=1}^{\infty} n G_{zn} B_{rn} \sin nZ\alpha \quad (11)$$

式中, L_a 为铁芯轴向长度; R_2 为定子内径; R_1 为转子外径; p 为极对数; n 取 $\frac{nZ}{2p}$ 为整数的整数。

从上述表达式看出,减小齿槽转矩可以通过改变磁极参数,降低 B_r 的幅值,达到减小的目的;改变电枢参数,降低 G_n 的幅值,方法包括改变槽宽、槽深、槽型、开槽个数、斜槽、各类辅助槽等,从而降低齿槽转矩;还可以通过改变槽数与极数搭配来降低齿槽转矩。减小齿槽转矩就归结为以上三类方法。

2 电机有限元仿真

本文研究的电机为8极12槽的表贴式永磁同步电机,在Ansys Maxwell建立2D模型,电机相关结构参数如下表1所示,电机有限元模型如图1所示。

表1 电机结构参数

Tab. 1 Motor structural parameters

参数	数值	参数	数值
额定电压	26 V	极数	8
额定功率	300 W	定子外径	57.5 mm
频率	50 Hz	定子内径	30.6 mm
转速	3 000 r/min	转子外径	29.4 mm
定子槽数	12	铁芯长度	25 mm

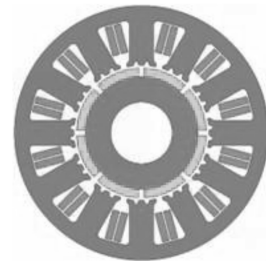


图1 电机有限元模型

Fig. 1 Finite element model of motor

3 辅助槽参数

3.1 辅助槽槽型对齿槽转矩的影响

辅助槽的引入改变了定子磁路结构^[11-13],导致磁场分布发生变化,减小了齿槽间隙部分的磁场不均匀性,从而减小齿槽转矩,辅助槽槽型的不同,会对齿槽部分磁导率发生变化,从而影响 G_n 改变了齿槽转矩。在研究辅助槽槽型对齿槽转矩的影响前,控制不同槽型下开槽面积相同为 0.85 mm^2 ,槽宽为定量,设置开槽个数为 2 个,未开槽前齿槽转矩为 $96.5 \text{ mN} \cdot \text{m}$,矩形槽齿槽转矩为 $65.8 \text{ mN} \cdot \text{m}$,优化了 31.81%;半圆形齿槽转矩为 $66.7 \text{ mN} \cdot \text{m}$,齿槽转矩优化 30.88%;三角形槽齿槽转矩为 $71.7 \text{ mN} \cdot \text{m}$,优化了 25.7%;梯形槽优化效果较好,齿槽转矩为 $63.1 \text{ mN} \cdot \text{m}$,削弱了 34.6%,所以梯形槽优化效果最好,设定定子辅助槽槽型为梯形。辅助槽形状如图 2 所示,不同辅助槽槽型齿槽转矩如图 3,图 4 所示。

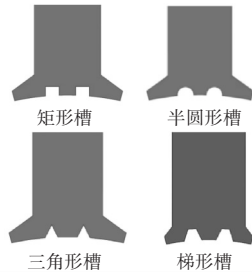


图 2 辅助槽形状

Fig. 2 Shape of auxiliary slot

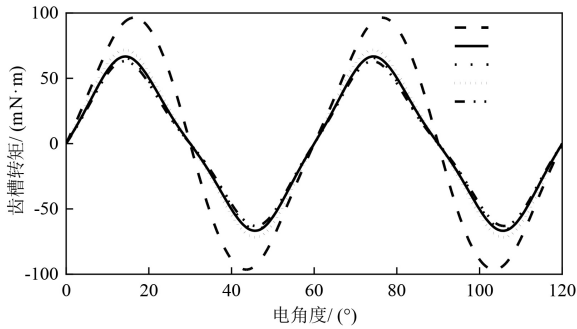


图 3 不同定子辅助槽形状齿槽转矩波形图

Fig. 3 Waveform diagram of cogging torque with different shapes of stator auxiliary slots

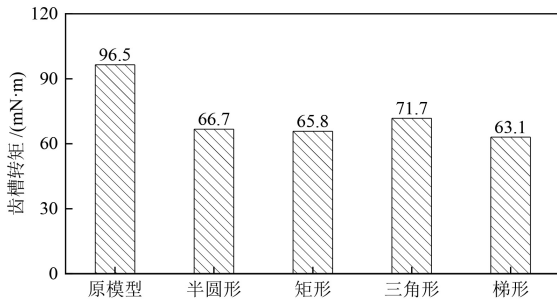


图 4 不同辅助槽形状齿槽转矩数值图

Fig. 4 Numerical diagram of cogging torque for different auxiliary slot shapes

3.2 辅助槽数量对齿槽转矩的影响

开槽数量不同意味着槽极比发生变化,可以改变齿槽转矩的谐波次数,当谐波含量下降时,齿槽转矩也随之下降。用 f_{pn} 表示齿槽转矩的谐波次数,即

$$f_{pn} = \frac{m \text{LCM}(2p, z)}{2p}, m = 1, 2, 3 \dots \quad (12)$$

式中, m 为整数, $2p$ 为极数, z 为槽数, $\text{LCM}(2p, z)$ 表示极数与定子槽数的最小公倍数。

齿槽转矩由多个谐波组成,每个谐波的振幅与其频率成反比。随着齿槽转矩谐波次数的增加,振幅逐渐减小。因此,改变辅助槽的数量实际上是调整了定子槽数 z 与电机极数 $2p$ 的最小公倍数。当开设 k 个辅助槽时,定子槽数 z 发生变化,导致 $\text{LCM}[2p, z(k+1)]$ 变大,谐波次数增大,幅值减小,从而有效降低齿槽转矩的影响。本文采用的是 12 槽 8 极的极槽配合,其 LCM 为 24,当开 1 个槽时,槽数 z 为 24,其 LCM 依旧为 24;当开 2 个槽时,槽数 z 为 36,其 LCM 为 72;当开 3 个槽时,槽数 z 为 48,其 LCM 为 48。从理论分析看,开槽数量为 2 个时,效果是较好的,考虑到开槽会影响到齿部机械强度以及结构合理性,因此本文只设定最大开槽数量为 3 个。

数据分析表明,当槽型设置为梯形时,开设辅助槽对齿槽转矩有显著影响。未开槽的初始模型齿槽转矩为 $96.5 \text{ mN} \cdot \text{m}$;开槽数量为 1 时,齿槽转矩增至 $161 \text{ mN} \cdot \text{m}$;开槽数量为 2 时,齿槽转矩降至 $60.5 \text{ mN} \cdot \text{m}$;开槽数量为 3 时,齿槽转矩稍微上升至 $80.6 \text{ mN} \cdot \text{m}$ 。仿真结果与理论分析一致,验证了开槽数量的合理性。辅助槽个数对齿槽转矩的影响如图 5 所示。

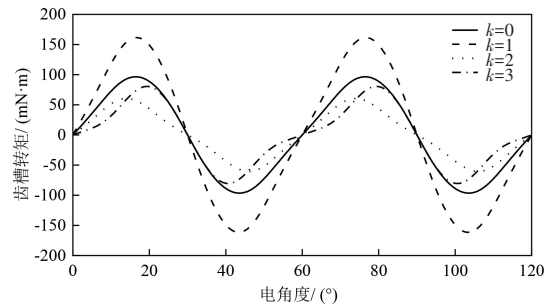


图 5 辅助槽个数对齿槽转矩的影响

Fig. 5 The influence of the number of auxiliary slots on cogging torque

3.3 槽深变化对齿槽转矩的影响

从 G_n 的数学表达式分析槽深对齿槽转矩的影响^[5],即

$$\begin{aligned} G_n &= \frac{z}{\pi} \left[\int_0^{\frac{b}{z}} \cos nL\theta d\theta + \int_{\frac{\pi}{z}}^{\frac{\pi}{z} + \frac{h}{2}} \cos nL\theta d\theta + \right. \\ &\quad \left. \int_{\frac{2\pi}{z} - \frac{h}{2}}^{\frac{2\pi}{z}} \cos nL\theta d\theta + \int_{\frac{4\pi}{z} - \frac{h}{2}}^{\frac{4\pi}{z}} \cos nL\theta d\theta \right] = \\ &= \frac{z}{\pi nL} \left[\sin(nL \frac{b}{z}) + 2\sin(\frac{h}{2} nL) \cos(nL \frac{\pi}{z}) + \right. \\ &\quad \left. 2\sin(\frac{b}{2} nL) \cos(nL \frac{2\pi}{z}) + 2\cos(\frac{4\pi}{z} nL - \right. \\ &\quad \left. \frac{b}{4} nL) \sin(\frac{b}{4} nL) \right] \quad (13) \end{aligned}$$

式中, L 为 LCM 极槽最小公倍数; b 为定子齿深; h 为辅助槽槽深; G_n 为电枢参数。

设置开槽形状为梯形, 开槽数量为 2, 槽宽 1.2 mm, 槽深范围 0.4~1.8 mm, 以 0.2 mm 为一个扫描区间, 研究不同槽深下的齿槽转矩变化, 数据表明随着槽深逐渐增大, 齿槽转矩先减后增, 槽深从 0.4~1.0 mm 变化中, 齿槽转矩急剧下降, 从 1.0~1.8 mm 区间内, 缓慢增加, 当槽深为 1 mm 时, 齿槽转矩优化最佳, 为 31.72 mN·m, 与未开槽前初始模型齿槽转矩 96.5 mN·m, 减小了 67.13%, 可见槽深对齿槽转矩的影响极大。不同槽深对齿槽转矩的影响如图 6 所示, 齿槽转矩随槽深变化趋势如图 7 所示。

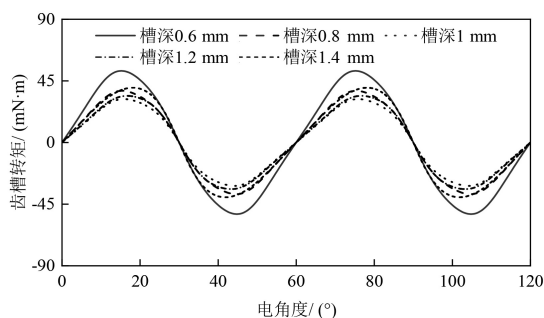


图 6 槽深变化对齿槽转矩特性的影响

Fig. 6 The influence of slot depth variation on the cogging torque characteristics

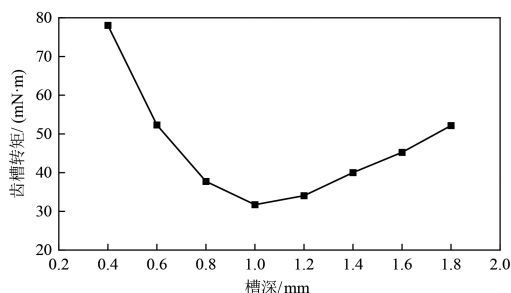


图 7 槽深变化对齿槽转矩的影响趋势

Fig. 7 Trend of the influence of slot depth variation on cogging torque

3.4 槽宽变化对齿槽转矩的影响

从 G_n 的数学表达式分析槽宽对齿槽转矩的影响

$$G_n = \frac{z}{\pi n L} \left[\sin(nL \frac{a}{2}) + 2\cos(\frac{\pi}{z} n L) \sin(nL \frac{y}{2}) + 2\cos(nL \frac{2\pi}{z}) \sin(nL \frac{a}{2}) + 2\cos(nL \frac{4\pi}{z} - nL \frac{y}{4}) \sin(nL \frac{y}{4}) \right] \quad (14)$$

式中, L 为 LCM 极槽最小公倍数, a 为定子齿宽, y 为辅助槽槽宽。

由上式可知, G_n 随着槽宽 y 的变化而变化, 设置辅助槽槽型为梯形, 开槽数量为 2, 槽深为 1 mm, 设置槽宽区间为 0.4~1.6 mm, 以 0.2 mm 为扫描区间, 研究不同槽宽下的齿槽转矩变化, 数据表明当槽宽从 0.4 mm 增大到 1.2 mm 时, 齿槽转矩从 78.05 mN·m 下降到 34.06 mN·m,

下降幅度很大, 当槽宽从 1.2 mm 增大到 1.6 mm 时, 齿槽转矩逐渐增大到 45.23 mN·m, 因此当槽宽为 1.2 mm 时, 齿槽转矩削弱效果较好, 与未开槽前初始模型齿槽转矩 96.5 mN·m 相比, 优化了 64.7%。数据表明槽宽对齿槽转矩的削弱有很大作用, 是关键性影响因子。不同槽宽对齿槽转矩的影响如图 8 所示, 齿槽转矩随槽宽变化趋势如图 9 所示。

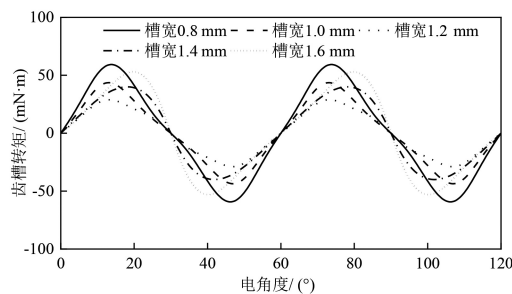


图 8 槽宽变化对齿槽转矩特性的影响

Fig. 8 The influence of slot width variation on the cogging torque characteristics

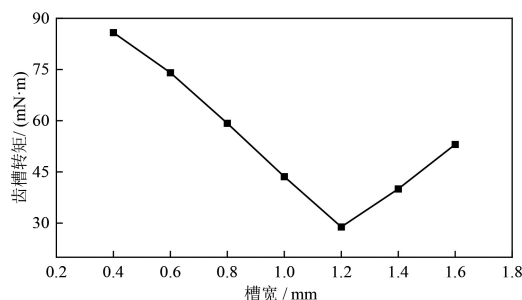


图 9 槽宽变化对齿槽转矩的影响趋势

Fig. 9 Trend of the influence of slot width variation on cogging torque

综上所述, 从辅助槽的槽型、数量、槽宽和槽深 4 个因素出发, 分析了它们对齿槽转矩变化的影响, 上述实验数据表明, 光从槽型形状和数量方面进行优化, 削弱程度只有 30% 左右, 优化效果一般, 在此基础上叠加了槽宽和槽深对齿槽转矩的影响, 优化效果高达 60% 以上, 从槽宽和槽深两方面进行数据分析, 发现当槽宽为 1.2 mm, 槽深为 1 mm 时, 最终齿槽转矩都在 30 mN·m 左右, 这两组实验效果相契合, 因此可以判断槽型形状为梯形, 开槽数量为 2, 槽宽为 1.2 mm, 槽深为 1 mm 时, 优化效果是较好的, 但是仍然存在缺陷, 本文是以 0.2 mm 为一个扫描区间, 若将扫描区间间隔减小, 最终的辅助槽参数会更加精确, 为此引入拉丁超立方算法, 以槽宽和槽深同时为变量, 为使优化效果更优, 将齿槽转矩和转矩脉动作为优化目标更进一步进行优化。

4 拉丁超立方算法优化

4.1 算法介绍

拉丁超立方算法 (latin hypercube sampling, LHS) 是一种用于设计实验、解决多目标优化问题的抽样技术, 以最

小的样本数生成一组高效的样本集合,代表整个样本空间的均匀分布。它的优点在于不再是以间隔单位进行扫描,单一地进行优化,它可以在多个水平的情况下,并且充分地考虑到各因素之间的交互作用,保证实验效率的前提下,减少实验样本数,既可以节约时间又可以保证实验数据的全面性。

4.2 算法优化

本案例进行拉丁超立方算法优化^[14],确定样本数为100个,维度为2,即槽宽和槽深,确定参数范围,槽宽为0.6~1.6 mm,槽深为0.6~1.6 mm,在每个维度上。随机选择一个分割点,生成初始样本,将该维度上的样本顺序打乱,确保每个样本在每个维度上的取值是唯一的,拉丁超立方算法所生成的样本组合包括不同槽宽和不同槽深,每一个样本都代表了一种优化方案。优化目标是齿槽转矩和转矩脉动,使用数学模型对每个样本进行模拟,计算出相对应样本的齿槽转矩和转矩脉动,从100组样本中挑选出最佳方案。横坐标 x 表示变量槽深,纵坐标 y 表示变量槽宽,散点图大小表示齿槽转矩大小,色调图表示转矩脉动大小,从100组样本中选取最优样本,对应的样本点为槽宽1.18 mm,槽深1.05 mm,齿槽转矩27.37 mN·m,转矩脉动15.3%,与未开槽前,齿槽转矩削弱了71.6%,脉动从原来的22%下降到15.3%,可见采用拉丁超立方算法进行深度优化后,辅助槽参数更为精确,电机性能更好。

本文研究辅助槽对齿槽转矩的影响,目的在于得出较小齿槽转矩下的辅助槽结构参数,为后期确定电机结构参数并进一步研究电机模态分析及振动和噪声做铺垫。综上对全文仿真数据结果分析,如下表2所示。

表2 仿真数据结果分析

Tab. 2 Analysis of simulation data results

槽结构	齿槽转矩/(mN·m)	优化效果/%
梯形槽	63.1	34.6
槽数2个	60.5	37.3
槽深(1 mm)	31.72	67.13
槽宽(1.2 mm)	34.06	64.7
初始模型	96.5	—
算法优化后	27.37	71.6

结合上表2和图10,通过拉丁超立方算法优化,将槽宽和槽深同时作为优化变量,当辅助槽槽型为梯形,开槽个数为2,槽宽为1.18 mm,槽深为1.05 mm时,齿槽转矩较小,因此辅助槽结构参数由此确定。

5 结论

本文详细介绍了定子辅助槽参数对齿槽转矩的影响,研究了槽型、辅助槽数量、槽宽和槽深对齿槽转矩的变化趋势,得出表贴式永磁同步电机12槽8极模型下,开梯形槽,槽数为2时,齿槽转矩优化效果较好,为提高优化效果和参数准确性,通过拉丁超立方算法对槽宽和槽深进行优化,齿槽转矩下降71.6%,提高了电机的可靠性以及确定辅助槽结构参数,为今后进一步研究振动和噪声作铺垫。

参考文献

[1] 刘娜,钟成堡,陈飞龙,等.极弧系数对永磁同步电机齿槽转矩影响的分析[J].微特电机,2022,50(8):15-18.

[2] 王伟,张学义,于成龙,等.基于极弧系数和转子相对偏转角的并列双转子电机齿槽转矩削弱方法研究[J].陕西科技大学学报,2023,41(6):139-144.

[3] 闫宏亮,武亚斌,杨泽心,等.定转子双开槽对永磁同步电机齿槽转矩的影响[J].组合机床与自动化加工技术,2023(7):166-170.

[4] 谷昭斌,王佳良,荣晖,等.定子辅助槽对永磁同步电机齿槽转矩的影响研究[J].时代汽车,2023(12):184-186.

[5] 陶彩霞,付名禄,高峰阳,等.辅助槽对内置式永磁同步电机齿槽转矩的影响[J].重庆大学学报,2021,44(4):64-76.

[6] 陈鑫,李国丽,钱喆等.转子开辅助槽削弱双层内置式永磁同步电机转矩脉动[J].微电机,2020,53(10):1-4,16.

[7] 夏加宽,于冰.定子齿开辅助槽抑制永磁电动机定位力矩[J].微特电机,2010,38(1):13-14,23.

[8] 张泽豫,焦志勇,夏洪兵,等.永磁同步电机转子表面辅助槽对齿槽转矩的影响研究[J].机电工程,2019,36(12):1342-1346.

[9] 李卫民,井天尧,陈静.辅助槽对永磁电机齿槽转矩的影响因素研究[J].辽宁工业大学学报(自然科学版),2017,37(3):153-156.

[10] 梁飞飞.基于有限元分析的表贴式永磁同步电机齿槽转矩研究[D].杭州:浙江工业大学,2016.

[11] 潘越.基于组合代理模型的内置式永磁同步电机多目标优化设计[D].南昌:华东交通大学,2023.

[12] 刘婷.表贴式永磁同步电机齿槽转矩削弱方法研究[D].长沙:湖南大学,2013.

[13] 陈上义.电动汽车分数槽集中绕组永磁同步电机设计与分析[D].杭州:浙江大学,2021.

[14] 丁锦,姜文刚.基于拉丁超立方算法的永磁同步电机设计优化[J].电机与控制应用,2023,50(8):66-72.

[15] 吴心梦,吴自燃,董西杰,等.一种工业机器人交流伺服电机结构的设计优化[J].科技与创新,2025(3):113-115,119.

[16] 辛国栋,胡岩,刘泽宇.车用永磁电机振动噪声及电磁转矩分析与优化[J].微特电机,2024,52(12):15-20.

[17] 黄友锐,沈玉轩,徐善永.融合机器学习的永磁同步电机数字孪生故障诊断技术研究[J].电测与仪表,2025,62(2):181-187.

[18] 孙洪宇,侯仕强,董立春,等.一种成像定位与速度补偿系统[J].自动化技术与应用,2024,43(4):31-33.

[19] 郝玉莲.面向智能化的新能源汽车电机控制系统设计[J].汽车实用技术,2025,50(6):22-27.