

新型调制齿结构内置式轮毂电机设计分析与转矩脉动优化

谢颖¹, 肖志博¹, 蔡蔚¹, 张泽阳²

(1. 哈尔滨理工大学 电气与电子工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080; 2. 东风汽车集团有限公司研发总院, 湖北 武汉 430058)

摘要: 轮毂电机因其高功率密度和空间利用率优势成为新能源汽车驱动系统的研究热点,但其轮毂集成特性对电机运行时的转矩波动抑制提出了更高要求。本文设计了一台额定功率46 kW、峰值功率114 kW的内置式永磁同步轮毂电机。针对转矩脉动较大的问题,首先分析了定转子拓扑结构对电机转矩脉动的影响并对其进行初步优化。在此基础上,基于气隙磁场调制原理提出一种新型非均匀磁场调制齿拓扑结构,结合现代粒子群算法对调制齿尺寸参数进行优化设计,进一步降低了电机的转矩脉动。通过有限元方法对电机的电磁性能进行分析,结果表明,优化后的电机不仅满足指标要求,在同激励条件下,额定转矩可由原来的161.00 N·m提升至172.11 N·m,转矩脉动由5.16%降低为1.76%,电机性能得到大幅度提升。

关键词: 永磁同步轮毂电机; 田口算法; 磁场调制齿; 粒子群算法; 转矩脉动

DOI: 10.15938/j.emc.2025.07.014

中图分类号: TM351

文献标志码: A

文章编号: 1007-449X(2025)07-0142-10

Design analysis and torque ripple optimization of novel modulated tooth structure internal hub motor

XIE Ying¹, XIAO Zhibo¹, CAI Wei¹, ZHANG Zeyang²

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China;

2. Dongfeng Motor Group Corporation Limited R&D Institute, Wuhan 430058, China)

Abstract: The wheel hub motor has become a research hotspot in the drive system of new energy vehicles due to its advantages of high power density and space utilization. However, its wheel hub integration characteristics put forward higher requirements for the suppression of torque ripple during motor operation. A built-in permanent magnet synchronous wheel hub motor with a rated power of 46 kW and a peak power of 114 kW were designed. Aiming at the problem of large torque ripple, the influence of the stator-rotor topology on the motor torque ripple was first analyzed and preliminarily optimized. On this basis, a new non-uniform magnetic field modulating tooth topology was proposed based on the air-gap magnetic field modulation principle, and the size parameters of the modulating teeth are optimized using a modern particle swarm optimization algorithm to further reduce the motor torque ripple. The electromagnetic performance of the motor was analyzed by the finite element method. The results show that the optimized motor not only meets the index requirements, but also under the same excitation conditions, the rated torque

收稿日期: 2025-01-13

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFB2504300)

作者简介: 谢颖(1974—),女,博士,教授,博士生导师,研究方向为电机内综合物理场计算、新能源汽车用电机设计及多目标优化;

肖志博(1999—),男,硕士研究生,研究方向为永磁同步轮毂电机的设计与优化;

蔡蔚(1959—),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为驱动电机、功率电子控制器及汽车电动化电驱动系统等;

张泽阳(1991—),男,硕士研究生,高级工程师,研究方向为轮毂电机驱动、分布式驱动控制及整车控制技术。

通信作者: 谢颖

is increased from the original $161.00 \text{ N} \cdot \text{m}$ to $172.11 \text{ N} \cdot \text{m}$, and the torque ripple is reduced from 5.16% to 1.76%, significantly improving the motor performance.

Keywords: permanent magnet synchronous hub motor; taguchi method; magnetic field modulation tooth; particle swarm optimization algorithm; torque ripple

0 引言

如今,社会对能源与环境问题的关注日益增加,国家正在大力推动新能源汽车产业发展,这已成为战略规划的重要组成部分^[1]。作为汽车的核心动力装置,内置式永磁同步轮毂电机因具有高功率和高车内空间利用率等优势,成为目前研究热点之一。合理化地设计一台体积小、转矩密度高的轮毂电机需要从定子槽型选择、转子磁极设计以及绕组分布等多方面考虑。但是,电机在追求高功率、高效率的同时,对于电机运行的平顺性也提出了更高要求,即尽量减小电机的转矩脉动。对于轮毂电机而言,转矩脉动较大,会导致电机在高速运行过程中稳定性变差,同时大的转矩脉动也会引发振动噪声问题,影响汽车运行的舒适性和安全性。因此,有必要根据转矩脉动的产生机理,探究一些简单有效、可靠性较高的设计优化方法和新型拓扑结构,拟解决电机带载运行时转矩脉动大的问题^[2]。

在轮毂电机设计过程中,分数槽集中绕组^[3]排布方式因具有绕组端部短、绕线工艺简单等优点得到广泛应用。文献[4]探究了不同槽极配合的分数槽集中绕组内置式永磁同步电机的电感、损耗和效率以及弱磁能力,并加工了一台8极12槽电机进行验证。文献[5]对比了整数槽与分数槽电机性能,发现分数槽电机齿槽转矩、转矩脉动较小,弱磁能力较强;内置式永磁体^[6]因具有较高转矩密度和更强的过载能力,在轮毂电机中得到广泛应用,在文献[7]中利用单V型永磁体设计了一台30 kW的永磁同步轮毂电机,并在此基础上,提出一种非对称V型磁极偏移转子,大幅度降低了电机的转矩脉动。

在轮毂电机优化过程中,田口算法是电机优化设计中一种重要算法,文献[8]利用一种改进的田口算法对一台低转速永磁辅助同步磁阻电机的主要结构参数进行优化分析,结果表明,改进后的算法相比于传统算法平均转矩提升更多,齿槽转矩和转矩脉动下降明显。文献[9]针对传统田口算法不适用于多目标大规模优化的问题,提出一种模糊法和序

贯田口法相结合的算法,此方法可以在更大的初始参数范围内获得更好的优化效果。转子斜极是降低齿槽转矩常用且有效的措施^[10]。文献[11]在一台额定功率31 kW、额定转矩72 N·m的发卡式车用永磁同步电机基础上,对比了线性分段斜极和V型分段斜极对电机齿槽转矩的影响,得出不同的斜极方式都可以降低电机的齿槽转矩,但线性分段斜极效果更好的结论。文献[12]利用一台8极12槽分数槽集中绕组电机,提出两种改进的斜极方法,旨在补偿端部漏磁以及相邻转子间的轴向相互作用,从而有效降低齿槽转矩。文献[13]在确定最优转子斜极角度的基础上,通过改变各斜极段的轴向长度发现,相比于均匀分段,不均匀的分段策略更能减小齿槽转矩,使得轴向磁通密度分布更均匀。定转子外表面开设辅助槽作为降低转矩脉动的一种方法^[14-17]。文献[18]通过在U型转子外表面开设转子辅助槽可以很好地改善气隙磁场分布,抑制电机的转矩脉动。同时,定子槽型的改变也对电机转矩特性有着重要影响^[19-20]。文献[21-22]分析了定子槽高、槽宽以及槽口参数变化对电机的输出转矩以及损耗情况的影响,研究表明,合理选择定子槽参数可以最大限度地降低转矩脉动并提升输出转矩。

本文设计一台额定功率为46 kW、峰值功率为114 kW的内置式V型分数槽集中绕组轮毂电机。针对电机在负载运行过程中存在转矩脉动大的问题,分别对定子和转子结构进行了优化设计。首先,利用田口算法以及转子线性分段斜极的方法,对转子结构尺寸进行优化;同时,以定子槽高、槽宽以及槽口参数为优化变量进行参数化分析,达到降低转矩脉动的目的。其次,在优化后的转子基础上,提出一种采用非均匀磁场调制齿的新型转子拓扑结构,进一步降低电机的转矩脉动,并对该结构的机械强度进行校核,验证结构的可靠性。最后,对优化后电机的空载及其负载特性进行仿真分析,其性能满足要求。结果表明,优化后电机在满足性能指标的同时,转矩脉动得到大幅度降低,电机的稳定性显著提高。

1 电机基本指标与结构

1.1 设计指标与参数

轮毂电机由于特殊的工作环境,对电机径向和轴向尺寸有着严格的限制。在空间限制条件下,本文所设计的电机参数以及设计指标如表 1 所示。

表 1 电机基本设计指标与参数

Table 1 Basic design indicators and parameters of motor			
参数	数值	参数	数值
定子外径/mm	320	额定功率/kW	46
转子外径/mm	227	额定转矩/(N·m)	160
轴向长度/mm	50	峰值功率/kW	114
气隙大小/mm	1.5	峰值转矩/(N·m)	320
极数	20	最高转速/(r/min)	8 000
槽数	24	电压平台/V	800

1.2 拓扑方案设计

本文所设计的电机采用扁线绕组技术,与传统圆形绕组相比,空间利用率更高,在不改变定子结构的前提下,可以增加槽内填充的铜量,从而提升电机的输出功率;同时,扁平形状绕组增大了与空气的接触面积,使热量能够更高效地散发出去,有助于降低电机的温度,延长电机的使用寿命;其次,由于扁线绕组形状规整,机械强度高,在电机运行过程中能更好地承受电磁力和机械应力,符合轮毂电机的应用场景。

转子侧选用 V 型磁极结构,该结构具有较强的聚磁能力,凸极比较大,d-q 轴电感差值较大,使得电机在负载运行中产生较大的磁阻转矩,有助于转矩性能提升;同时,该结构在不同的 d 轴与 q 轴电流控制时,电感与凸极比变化波动较小,弱磁扩速能力比较稳定,在轮毂电机高封闭性、高转速运行条件中较为合适。

针对表 1 中的设计指标与参数,对扁线绕组尺寸、定子齿部和轭部结构以及转子磁极结构进行初步设计,确定了电机基本方案,电机三维模型如图 1 所示。

2 电机结构优化与分析

根据表 1 中确定的电机基本方案,在满足电机功率及转矩指标要求时,电机在额定工况和峰值工况下的转矩脉动分别为 5.16% 和 3.60%,较大的转

矩脉动会使电机的运行平顺性变差,故下文对电机的定、转子结构进行优化分析,使其在维持电机平均转矩的基础上,降低转矩脉动。

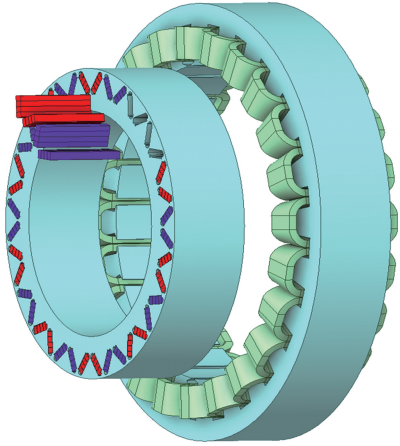


图 1 电机三维模型图

Fig.1 3D model diagram of the motor

2.1 转子磁极优化

本文设计的转子结构如图 2 所示,定义永磁体间夹角为 A ,永磁体长度为 B ,永磁体间隔磁桥厚度为 C ,永磁体距离转子外圆隔磁桥厚度为 D 。利用田口算法对转子磁极进行优化与分析,优化因子及水平值如表 2 所示。

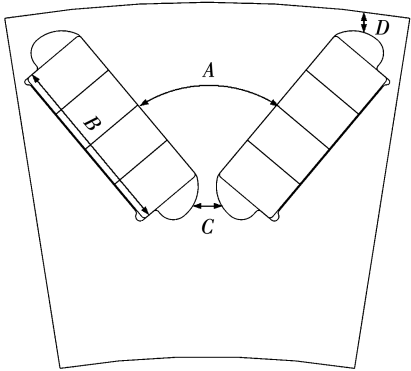


图 2 单极转子结构图

Fig.2 Unipolar rotor structure diagram

表 2 优化因子及水平值

Table 2 Optimization factors and level values			
优化因子	水平 1	水平 2	水平 3
$A/(^{\circ})$	80.0	75.00	70.00
B/mm	15.5	16.00	16.50
C/mm	1.50	1.75	2.00
D/mm	1.60	1.80	2.00

选取额定工况下平均转矩 T_{avg} 与转矩脉动 T_{pkavg} 作为优化目标,按照表 2 中优化因子的水平所代表的取值进行有限元仿真,得出每次实验 T_{avg} 和 T_{pkavg} 的值,建立正交表 $L_9(3^4)$,所得结果如表 3 所示。

表 3 正交表及有限元结果
Table 3 Orthogonal array and finite element results

实验次数	A	B	C	D	$T_{\text{avg}}/(\text{N} \cdot \text{m})$	$T_{\text{pkavg}}/\%$
1	1	1	1	1	163.89	5.95
2	1	2	2	2	161.00	5.16
3	1	3	3	3	157.76	4.09
4	2	1	2	3	152.46	6.39
5	2	2	3	1	161.79	5.97
6	2	3	1	2	165.98	5.64
7	3	1	3	2	152.70	6.54
8	3	2	1	3	157.27	6.11
9	3	3	2	1	166.25	6.02

为了找到优化因子对优化目标的影响规律,按照数据统计的方法,根据下式可计算出优化因子在三个水平下 T_{avg} 和 T_{pkavg} 的平均值,结果如表 4 所示,即

$$T_n(x_m) = \frac{1}{3}[T_n(1) + T_n(2) + T_n(3)]。$$
(1)

式中: $T_n(x_m)$ 为优化因子 x 在水平 m 下优化目标 n 的平均值(其中 x 可取 $A、B、C、D$ 四个优化因子, m 可取 1、2、3 三个优化水平, n 可取 $T_{\text{avg}}、T_{\text{pkavg}}$ 两个优化目标)。

表 4 各优化因子在各水平下优化目标的平均值
Table 4 Average values of optimization objectives for each optimization factor at all levels

优化因子	水平	$T_{\text{avg}}/(\text{N} \cdot \text{m})$	$T_{\text{pkavg}}/\%$
A	1	160.88	5.07
	2	160.08	6.00
	3	158.74	6.22
B	1	156.35	6.29
	2	160.02	5.75
	3	163.33	5.25
C	1	162.38	5.90
	2	159.90	5.86
	3	157.42	5.53
D	1	163.98	5.98
	2	159.89	5.78
	3	155.83	5.53

利用方差分析方法,按下式可计算得到各优化因子对 T_{avg} 和 T_{pkavg} 的影响比重,计算结果如表 5 所示,即

$$S = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 (r_i(x) - r)^2。$$
(2)

式中: $r(x)_i$ 为表 4 中优化因子 x 在水平 i 下优化目标的平均值(其中 x 可取 $A、B、C、D$ 四个优化因子, i 可取 1、2、3 三个优化水平); r 为优化目标总平均值。

表 5 各优化因子在不同优化目标下的方差及比重
Table 5 Variance and proportion of each optimization factor for different optimization objectives

参数	T_{avg}		T_{pkavg}	
	S	比重/%	S	比重/%
A	0.779 5	3.24	0.248 4	50.67
B	8.127 3	33.75	0.180 4	36.80
C	4.100 3	17.03	0.027 5	5.61
D	11.070 5	45.98	0.033 9	6.92
总计	24.077 6	100.00	0.490 2	100.00

由表 4 和表 5 的数据分析可知,优化因子 $B、C、D$ 是影响 T_{avg} 的主要因素;而 $A、B、D$ 是影响 T_{pkavg} 的主要因素。因此,通过合理选取相关因子的数值可以有效地改善电机的性能表现。

综上所述,选取 $A(1)B(3)C(1)D(1)$ 的参数组合,电机可以达到最佳性能,表 6 中展示了优化前后电机结构参数和性能的对比结果。可以看出,利用田口算法找到的电机最佳转子结构尺寸,能够确保电机在提高平均转矩的同时减少转矩脉动。

表 6 优化前后电机结构参数以及性能对比
Table 6 Comparison of motor structural parameters and performance before and after optimization

参数	优化前	优化后
$A/(\text{°})$	80.00	80.00
B/mm	16.00	16.50
C/mm	1.75	1.50
D/mm	1.80	1.60
$T_{\text{avg}}/(\text{N} \cdot \text{m})$	161.00	170.74
$T_{\text{pkavg}}/\%$	5.16	4.81

2.2 转子分段斜极优化

转子分段斜极是削弱电机齿槽转矩及转矩脉动的一种有效办法,适用于轮毂电机的设计优化中。

故本文以能量法为根据^[23],推导出最佳斜极角度 α 与分段数 j 之间的关系为

$$\alpha = \frac{2(j-1)\pi}{jN_L}. \quad (3)$$

式中 N_L 是定子槽数与转子极数的最小公倍数。

根据式(3)中给出的转子最佳斜极角度与分段数的关系,在表7中列出分段数从0段到6段变化时,斜极角度的变化示意图。

表7 斜极段数与角度关系图

Table 7 Diagram of skew pole segments and angle relationships

斜极段数	斜极角度/(°)	斜极示意图
0	0	
2	1.5	
3	2	
4	2.25	
5	2.4	
6	2.5	

根据永磁同步电机理论^[2]可知,电机的输出转矩 $T_{em-skew}$,可表示为永磁转矩 $T_{pm-skew}$ 与磁阻转矩 $T_{re-skew}$ 之和。

$$T_{em-skew} = T_{pm-skew} + T_{re-skew} = \frac{3}{2}p\psi_{ft}i_s\sin\gamma + \frac{3}{2}p(L_{dt} - L_{qt})i_s^2\sin\gamma\cos\gamma. \quad (4)$$

式中: ψ_{ft} 为永磁体的磁链; i_s 为定子电流; L_{dt} 和 L_{qt} 为d轴和q轴的电感; γ 为定子电流与反电动势之间的夹角; p 为电机的极对数。

当转子采用分段斜极设计时,永磁转矩和磁阻转矩变为:

$$T_{pm-skew} = \frac{3}{2}p\psi_{ft}i_s\sin\gamma = \frac{3}{2}p\psi_{ft} \frac{\sin\left[\frac{j\alpha}{2(j-1)}\right]}{j\sin\left[\frac{\alpha}{2(j-1)}\right]}i_s\sin\gamma; \quad (5)$$

$$T_{re-skew} = \frac{3}{2}p(L_{dt} - L_{qt})i_s^2\sin\gamma\cos\gamma = \frac{3}{2}p(L_d - L_q) \times \frac{\sin\left[\frac{j\alpha}{2(j-1)}\right]}{j\sin\left[\frac{\alpha}{2(j-1)}\right]}i_s^2\sin\gamma\cos\gamma. \quad (6)$$

式中: ψ_{ft} 为转子未斜极时的磁链; L_d 和 L_q 为转子未斜极时d轴和q轴的电感。

由式(5)和式(6)可知,随着分段数 j 的增加, $T_{pm-skew}$ 与 $T_{re-skew}$ 逐渐减小,最终导致 $T_{em-skew}$ 也逐渐变小。

表8 不同斜极段数的电磁性能

Table 8 Electromagnetic performance of different skew pole segments

斜极段数	平均转矩/(N·m)	转矩脉动/%
0	170.74	4.81
2	169.00	3.84
3	168.66	3.74
4	168.55	3.70
5	168.50	3.68
6	168.47	3.66

表8为利用有限元仿真方法得到的转子不同斜极段数时电机输出的平均转矩和转矩脉动情况。由表可知,随着转子分段数增多,转矩脉动逐渐变小,平均转矩也随之减小,这与式(5)和式(6)得到的结论相互验证。但当斜极段数到3段以后,随着斜极段数的增加,转矩脉动变化不再明显,故综合电磁性能和加工工艺两方面考虑,本优化方案中斜极段数取3。

2.3 定子槽型优化

定子齿部和定子轭部尺寸的改变会使得定子槽型发生变化,进而影响整个定子磁路的磁阻;同时,槽型的变化也会影响电机的磁场分布,改变电机运行过程中的磁路特性,导致电机空载时齿槽转矩和负载时纹波转矩发生变化,最终影响电机的电磁性能。故本节对图3所示的定子槽结构进行优化分析,优化参数为定子槽高 L 、定子槽宽 W 、槽口宽度 WK 以及槽口高度 HK 。

定义定子槽高 L 与定子槽宽 W 的比值为定子长宽比。经过多轮仿真计算可知,当长宽比小于1.8时,不仅会使电机的平均转矩下降,转矩脉动升高,

长宽比过小也会使槽宽过宽,导致定子齿部磁密过高,造成齿部磁饱和;当长宽比大于2.2时,不仅会使线反电势峰值超过电机设计阈值,长宽比过大也会使槽高过高,导致定子轭部磁密过高,造成轭部磁饱和。所以,为了控制电机齿部、轭部磁密以及反电势峰值在合理范围内,维持良好的电磁性能,确保电机在负载情况下可靠运行,本文选取定子槽长宽比的优化范围区间为1.8~2.2。

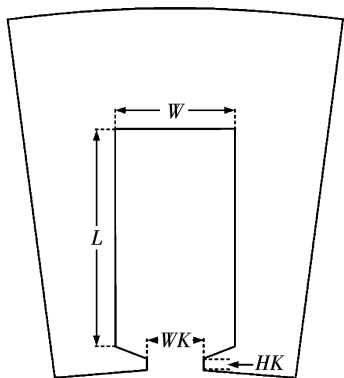


图3 定子槽结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of stator slot structure

图4为额定工况下平均转矩和转矩脉动与定子槽长宽比的变化关系。由图可知,随着长宽比的增大,平均转矩上升、转矩脉动下降,当长宽比为2.2时电机的电磁性能最好,电机的平均转矩提升至170.01 N·m,转矩脉动下降为3.55%。

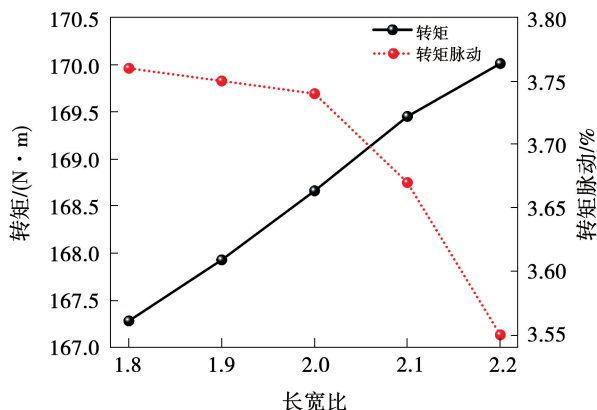
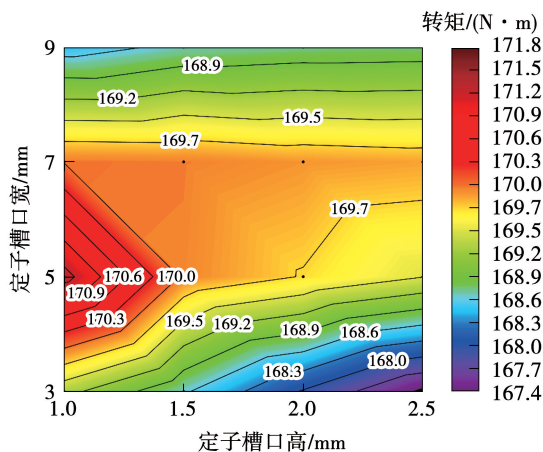


图4 定子槽长宽比对电磁性能的影响

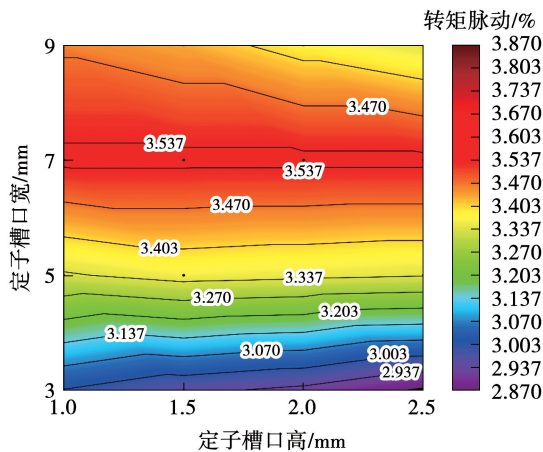
Fig. 4 Impact of stator slot aspect ratio on electromagnetic performance

定子槽口开度和高度的大小也同样影响着电机的性能指标,所以在维持定子长宽比为2.2不变时,探究了定子槽口尺寸的变化对电机输出性能的影响。图5所示为不同的槽口宽度WK和槽口高度

HK对电机平均转矩以及转矩脉动的影响云图。



(a) 槽口参数与平均转矩关系云图



(b) 槽口参数与转矩脉动关系云图

图5 槽口参数对电磁性能的影响

Fig. 5 Impact of slot opening parameters on electromagnetic performance

由图5(a)可知,当定子槽口高度在1~1.5 mm、槽口宽度在3~7 mm区间内,平均转矩较高;由图5(b)可知,槽口宽度在3~5 mm区间内,相比于其他槽口宽度而言,在槽口高度变化时,转矩脉动最小。综合考虑在槽口参数优化区间内电机的平均转矩与转矩脉动性能表现,选择定子槽口高度为1 mm、定子槽口宽度为5 mm为最优尺寸,电机的转矩脉动下降至3.33%,平均转矩上升为171.33 N·m。

3 新型转子调制齿结构研究

前文已经对电机的定子和转子结构分别进行了优化,优化后电机在额定工况下的平均转矩达到171.33 N·m、转矩脉动为3.33%。为了进一步提升电机的使用寿命以及汽车运行的平顺性,本文提

出一种在转子外圆面增设非均匀突齿的新型转子结构,本文定义其为非均匀磁场调制齿,此结构可以在维持电机平均转矩的基础上,大幅度降低电机的转矩脉动,提升电机的可靠性和稳定性。

3.1 参数化建模

本文所设计的新型转子结构在极坐标下的示意图如图 6 所示,理论上每一极下的转子外圆可以设置多个调制齿结构,但是随着调制齿数量的增加,代表调制齿结构的极坐标参数变量也逐渐增多,这样不仅会在优化过程中增加计算量,转矩脉动的减小量也相差不大,所以结合计算量和电磁性能两方面考虑,此调制齿个数设置为 4 个,即 $M1 - M4$ 。从图中可以看出,用 O_i 来表示第 i 块调制齿的位置参数,用 X_j 来表示第 j 块调制齿的角度参数; HH 用来表示调制齿的高度参数,但为了防止高度参数 HH 过大导致电机在高速运转过程中存在扫膛风险,本文将调制齿高度参数 HH 限制在 0.6 mm 范围内。

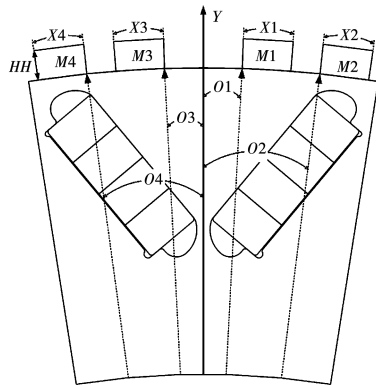


图 6 极坐标系下非均匀磁场调制齿的参数化示意图

Fig. 6 Parametric schematic diagram of non-uniform magnetic field modulation teeth in polar coordinates

3.2 粒子群优化算法

由上述分析可知,调制齿在寻优过程中涉及到多个优化变量,优化基数较大,而粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO) 算法作为一种计算速度快、算法简单且具有强全局搜索能力的算法,可以对其进行综合优化。定义调制齿位置参数 $O1 - O4$ 、角度参数 $X1 - X4$ 以及齿高参数 HH 的优化区间如表 9 所示,在此区间内利用 PSO 算法,寻找平均转矩最大、转矩脉动最小的最优解。

利用 PSO 算法,得到图 7 所示的优化种群迭代帕累托散点图,综合平均转矩和转矩脉动考量,选取第 172 个点为最优解。由图可知,通过开设这种新

型不均匀磁场调制齿,使电机在额定工况下的转矩脉动达到 1.76% ,较优化前的 3.33% 大幅度下降;平均转矩达到 $172.11\text{ N}\cdot\text{m}$,较优化前的 $171.33\text{ N}\cdot\text{m}$ 略有上升。调制齿最优解尺寸参数如表 10 所示。

表 9 调制齿参数优化区间

Table 9 Optimization range of modulation tooth parameters

参数	变量范围/mm
HH	$0.1 \sim 0.6$
$O1$	$0 \sim 4.5$
$X1$	$0 \sim 4.5$
$O2$	$4.5 \sim 9.0$
$X2$	$0 \sim 4.5$
$O3$	$0 \sim 4.5$
$X3$	$0 \sim 4.5$
$O4$	$4.5 \sim 9.0$
$X4$	$0 \sim 4.5$

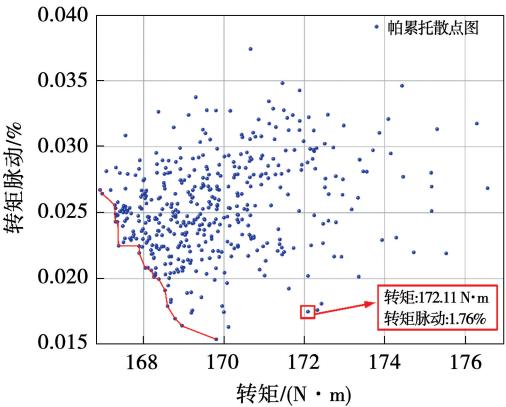


图 7 PSO 算法种群迭代帕累托散点图

Fig. 7 PSO algorithm population iteration Pareto scatter plot

表 10 最优解参数值

Table 10 Optimal solution parameter values

参数	数值/mm
HH	0.574 426
$O1$	1.796 650
$X1$	0.756 096
$O2$	6.576 310
$X2$	1.052 050
$O3$	0.735 938
$X3$	0.486 450
$O4$	6.257 980
$X4$	1.989 560

利用这种新型不均匀磁场调制齿减小转矩脉动的主要原因就是纹波转矩的变化,纹波转矩主要是由反电动势与定子电流中不同频次谐波含量引起的,本文优化前后电机具有相同电流激励,故只需要考虑由电机转子结构变化导致的反电势谐波含量变化^[24-28]。

图 8 对比了转子有无调制齿时的反电势谐波情况,结果表明采用不均匀调制齿结构的电机相基波幅值上升、3 次、5 次、7 次谐波幅值均下降,其他次数谐波幅值有小幅上升,计算得调制齿转子谐波畸变率 THD 为 0.71%,而无调制齿结构的转子 THD 为 1.31%。由此可知,电机的反电势谐波含量降低,纹波转矩减小,使得转矩脉动降低。

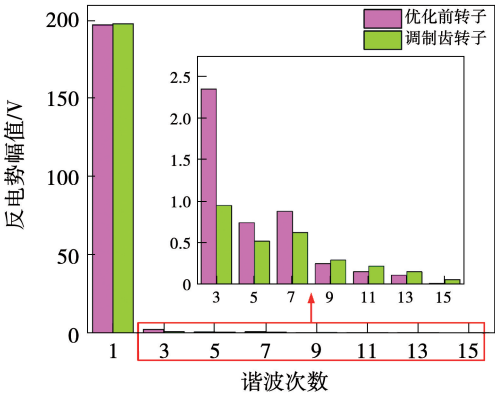


图 8 反电势傅里叶分解对比图

Fig. 8 Comparison of back EMF Fourier decomposition

3.3 转子动力学分析

内置式永磁电机转子的隔磁桥在高速运转过程中会受到较大离心力,当离心力超过转子硅钢片材料的最大屈服强度时,转子结构会被破坏。因此为了保证电机在极限情况下仍能可靠运行,需要根据表 11 的转子材料属性,对利用调制齿结构的转子强度进行校核。

表 11 转子材料属性

Table 11 Properties of rotor material

材料属性	25SW1250H	永磁体
密度/(kg/m ³)	7 650	7 500
弹性模量/GPa	170	160
泊松比	0.3	0.24
屈服强度/MPa	441	160

图 9 为调制齿结构转子在 1.2 倍最高转速

(9 600 r/min) 下的应力与形变云图。由图可知,转子的高应力区域出现在永磁体磁钢槽和隔磁桥位置,最大应力为 387.28 MPa,最大形变为 0.098 mm,最大应力值小于硅钢片的最大屈服强度 441 MPa,该结构满足强度要求。

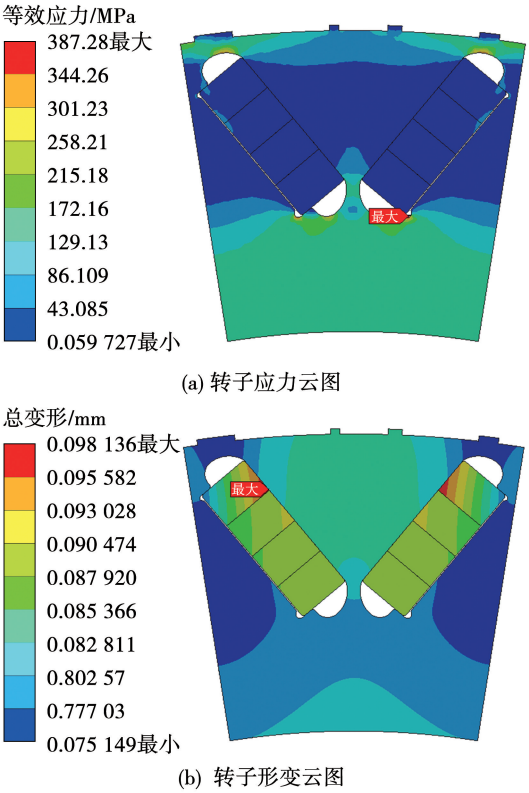


图 9 转子应力和形变云图

Fig. 9 Rotor stress and deformation cloud map

4 电机运行性能分析

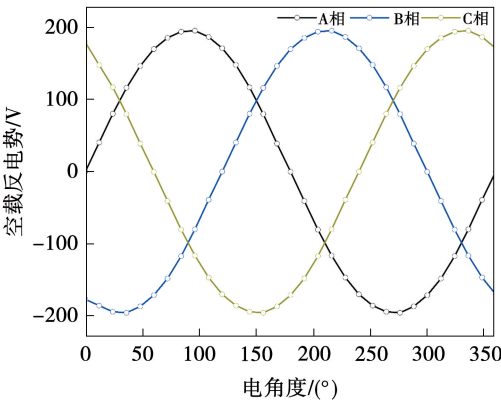
经上述优化后,确定了电机电磁性能最优的定子结构方案,结合表 1 中电机的设计指标对优化后电机的空载特性、负载特性进行研究与分析。

4.1 空载性能分析

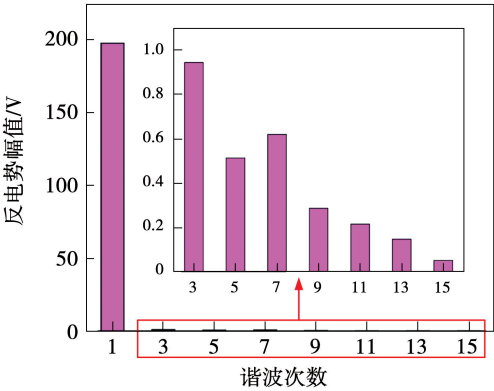
空载反电动势是电机电磁性能的一个重要参考指标,对电机质量的评估至关重要。因此,经仿真计算得到电机的空载反电势及其各次谐波情况,结果如图 10 所示,由图 10(b) 可知,电机的各次谐波幅值较小,基波幅值较高,THD 为 0.71%,反电势正弦性高,电机的运行稳定性好。

气隙磁密对电机输出的平均转矩、转矩脉动、功率因数等都有着重要影响。因此,本文对电机的空载气隙磁密进行了仿真分析,由图 11 可知,气隙磁

密幅值为 1.479 7 T。



(a) 空载反电势波形



(b) 谐波含量

图 10 空载反电势及其傅里叶分解

Fig. 10 No load back EMF and its Fourier decomposition

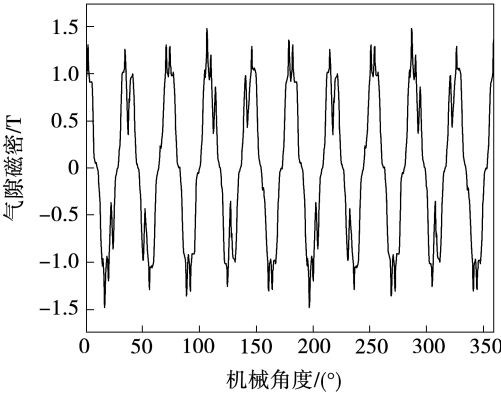


图 11 空载气隙磁密

Fig. 11 No load air gap flux density

齿槽转矩作为内置式永磁电机存在的一种固有现象,过大的齿槽转矩波动可能会导致输出转矩不稳定,进而影响电机的振动和噪声。因此,有必要对电机空载运行时的齿槽转矩进行仿真分析,仿真结果如图 12 所示,由图可知齿槽转矩峰峰值约为

1.516 N · m,齿槽转矩占比输出转矩的比重较小,电机运行平稳性更好。

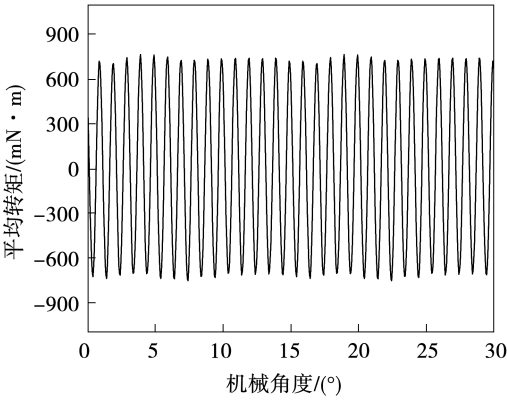


图 12 空载齿槽转矩

Fig. 12 No load cogging torque

4.2 负载性能分析

输出转矩作为电机最重要的特性之一,也是本文主要的优化目标。在表 12 中,对比了额定工况和峰值工况下电机优化前后的平均转矩与转矩脉动性能。

表 12 优化前后电磁性能对比

Table 12 Comparison of electromagnetic performance before and after optimization

工况点	平均转矩/(N · m)		转矩脉动/%	
	优化前	优化后	优化前	优化后
额定工况	161.00	172.11	5.16	1.76
峰值工况	321.66	336.51	3.60	1.79

由上表可知,优化后的电机在同激励条件下,额定转矩可由原来的 161.00 N · m 提升至 172.11 N · m,转矩脉动由 5.16% 减小为 1.76%;峰值转矩可由原来的 321.66 N · m 提升至 336.51 N · m,转矩脉动由 3.60% 减小为 1.79%。结果表明,优化后电机的平均转矩更大、转矩脉动更小,电机运行稳定性得到大幅度提升。

5 结 论

本文根据工艺以及性能要求,设计了一台额定功率为 46 kW、峰值功率为 114 kW 单 V 型转子磁极的分数槽集中绕组轮毂电机。利用有限元方法对电机的磁极结构、转子斜极段数以及定子槽尺寸进行优化设计,降低了电机的转矩脉动;并在此基础

上,提出了一种新型非均匀磁场调制齿转子拓扑结构,在保证输出转矩的前提下进一步降低了转矩脉动,最后对优化后的转子进行强度校核,可以得到以下结论:

2)在电机设计过程中,本文结合了分数槽集中绕组端部布线尺寸短、扁线绕组槽满率高、机械强度高以及单V型磁极结构聚磁能力强的独特优势,使得电机在整体结构上更加紧凑,非常适合应用于需要高转速、高扭矩输出特性的轮毂电机。

3)在电机优化过程中,首先,在转子侧利用田口算法找到永磁体以及隔磁桥尺寸的最优组合,并通过3段斜极的方式使电机转矩脉动下降至3.74%;其次,在定子侧对定子槽高、槽宽以及槽口参数进行优化,确定了电磁性能最优的定子槽尺寸,将电机平均转矩提高到 $171.33\text{ N}\cdot\text{m}$,转矩脉动降低到3.33%。

4)本文提出的新型非均匀磁场调制齿拓扑结构,通过在转子外圆面开设四块不均匀突齿的方式,将平均转矩提升至 $172.11\text{ N}\cdot\text{m}$,转矩脉动降低至1.76%,并对该结构转子进行强度校核,结果表明,在1.2倍最高转速下转子最大应力小于硅钢片屈服强度,证明了新型拓扑结构的可靠性。

5)最后对优化后电机的空载反电势、气隙磁密、齿槽转矩以及负载情况下输出转矩与转矩脉动特性进行仿真分析。结果表明,优化后电机的输出性能均满足设计指标,并且转矩脉动相较于原始方案大幅度下降,电机稳定性提高。

参考文献:

- [1] WU X Q, LI H, REN Q L, et al. Overview of the development and related research of electric vehicles[C]//2017 2nd International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE), October 18–21, 2017, Chengdu, China. 2017: 814–818.
- [2] 唐任远. 现代永磁电机理论与设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- [3] 项渝. 永磁同步电机结构分析与优化设计[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
- [4] 周晨曦. 电动汽车分数槽集中绕组内置式永磁同步电机的分析与设计[D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
- [5] 王亚玮. 电动汽车用分数槽集中绕组永磁电机设计与分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
- [6] 雷蕾. 电动汽车用分数槽集中绕组永磁电机设计与分析[D]. 南京: 东南大学, 2018.
- [7] 李晓峰. 内置式永磁同步轮毂电机设计及转矩分析优化[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2021.
- [8] HU W G, SUN H Q, LI G S, et al. Optimization of cogging torque of permanent magnet-assisted synchronous reluctance motor based on improved taguchi method[C]//2023 6th International Conference on Electrical Engineering and Green Energy (CEE-GE), August 11–14, 2023, Grimstad, Norway. 2023: 124–129.
- [9] SUN X D, SHI Z, ZHU J G. Multiobjective design optimization of an IPMSM for EVs based on fuzzy method and sequential taguchi method[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(11): 10592.
- [10] CHEN W, MA J, WU G C, et al. Torque ripple reduction of a salient-pole permanent magnet synchronous machine with an advanced step-skewed rotor design[J]. IEEE Access, 2020, 8: 118989.
- [11] 谢颖, 何自豪, 蔡蔚, 等. 车用发卡式绕组永磁同步电机的设计与优化[J]. 电机与控制学报, 2021, 25(12): 36.
XIE Ying, HE Zihao, CAI Wei, et al. Design and optimization of permanent magnet synchronous motor with hairpin winding for vehicle[J]. Electric Machines and Control, 2021, 25(12): 36.
- [12] GE X, ZHU Z Q, KEMP G, et al. Optimal step-skew methods for cogging torque reduction accounting for three-dimensional effect of interior permanent magnet machines[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(1): 222.
- [13] LUU P T, LEE J Y, HWANG W, et al. Cogging torque reduction technique by considering dtep-skew rotor in permanent magnet synchronous motor[C]//2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), June 15–18, 2018, Jeju, Korea(South). 2018: 219–223.
- [14] MA G, LI G L, ZHOU R, et al. Effect of stator and rotor notches on cogging torque of permanent magnet synchronous motor[C]//2017 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), September 16–19, 2017, Sydney, NSW, Australia. 2017: 1–5.
- [15] YAMAZAKI K, UTSUNOMIYA K, TANAKA A, et al. Rotor surface optimization of interior permanent magnet synchronous motors to reduce both rotor core loss and torque ripples[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(4): 4488.
- [16] WAN X B, YANG S, LI Y C, et al. Minimization of cogging torque for V-type IPMSM by the asymmetric auxiliary slots on the rotor[J]. IEEE Access, 2022, 10: 89428.
- [17] JIN M L, LUO L, CHAI Y, et al. Optimization design of permanent magnet synchronous motor torque ripple based on stator tooth crown slotting method[C]//2023 32nd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), October 1–4, 2023, Helsinki, Finland. 2023: 1–6.

- and its high efficiency operation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(18): 4625.
- [21] 韩国强, 陆哲, 吴孟霖, 等. 基于改进滑模控制策略的开关磁阻电机直接瞬时转矩控制方法[J]. 电工技术学报, 2022, 37(22): 5740.
- HAN Guoqiang, LU Zhe, WU Menglin, et al. Direct instantaneous torque control method for switched reluctance motor based on an improved sliding mode control strategy [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(22): 5740.
- [22] 颜宁, 曹鑫, 张蕾, 等. 基于直接转矩控制的开关磁阻电机模型预测控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(18): 5446.
- YAN Ning, CAO Xin, ZHANG Lei, et al. Direct torque control-based model predictive control of switched reluctance motors[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(18): 5446.
- [23] HAO Z Y, YU Q, CAO X. An improved direct torque control for a single-winding bearingless switched reluctance motor[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2020, 35(3): 1381.
- [24] 周云红, 王东, 黄飞, 等. 宽转子极无轴承开关磁阻电机径向力模型全周期拓展[J]. 电机与控制学报, 2024, 28(2): 182.
- ZHOU Yunhong, WANG Dong, HUANG Fei, et al. Full-period extension of radial force model for bearingless switched reluctance motor with wide rotor[J]. Electric Machines and Control, 2024, 28(2): 182.
- [25] 杨帆, 陈昊, 李晓东, 等. 一种优化开关磁阻电机换相区控制策略的高效率转矩分配函数[J]. 电工技术学报, 2024, 39(6): 1671.
- YANG Fan, CHEN Hao, LI Xiaodong, et al. An efficient torque sharing function for optimizing the commutation zone control strategy of switched reluctance motors [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(6): 1671.

(编辑:刘琳琳)

(上接第151页)

- [18] ZHANG D D, LIU J Y, YI J W, et al. Design and torque ripple optimization of U-type permanent magnet synchronous motor [C]//2023 26th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), August 17–20, 2023, Zhuhai, China. 2023: 5058–5063.
- [19] 过铠煜. 电动汽车用扁线永磁同步电机设计与转矩性能优化分析[D]. 南昌: 南昌大学, 2023.
- [20] 韩常青. 基于扁线绕组的高效率永磁同步电机的设计与优化[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2022.
- [21] 李厚宇. 发卡绕组双层内置式永磁同步电机的设计与分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2022.
- [22] 蔡唯世. 电动汽车用发卡绕组永磁同步电机交流损耗研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
- [23] NIAN S, ZHU L, LUO X, et al. Analytical methods for optimal rotor step-skewing to minimize cogging torque in permanent magnet motors[C]//2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), January 27–29, 2019, Harbin, China. 2019: 1–5.
- [24] KRAUSE P, WASYNICZUK O, SUDHOFF S D, et al. Analysis of electric machinery and drive systems[M]. Wiley-IEEE Press, 2013.
- [25] LIANG J C, PARSAPOUR A, MOALLEM M, et al. Asymmetric rotor surface design in interior permanent magnet synchronous motors for torque ripple mitigation[C]//2019 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), October 15–18, 2019, San Diego, CA, USA. 2019: 727–732.
- [26] 洪涛. 电主轴永磁同步电机转矩脉动抑制与气隙磁密优化研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021.
- [27] 赵纪宗. 内置式永磁同步电机转矩脉动抑制方法的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.
- [28] 吴长江. 永磁同步电机转矩脉动抑制及其相关性能优化研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.

(编辑:刘素菊)