

本文全文线上首发由
上海电机系统节能工程技术
研究中心有限公司
支持

王海燕,江郑龙,晁鹏博,熊端锋,代颖.
车用永磁同步电机定子铁耗的分析
与优化.
电机与控制应用,2021,48(9):96.

MTST系列 电机型式试验系统



MTST系列 电机型式试验系统①



MTST系列 电机型式试验系统②



MTST系列 电机型式试验系统③



MTST系列 电机型式试验系统④



MTST系列 电机型式试验系统⑤

CS-XY型电机出厂试验测试系统



DZC系列电机定子性能综合测试仪



TZ型电机堵转转矩测试仪



RZJ系列绕组匝间冲击耐电压测试仪



SEARI
上电科



地址: 上海市武宁路505号 传真: 021-62163904

电话: 021-62574990-436、18918357509

邮编: 200063

邮箱: wangcj@seari.com.cn

上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司 www.seari.com.cn

车用永磁同步电机定子铁耗的分析与优化

王海燕¹, 江郑龙², 晁鹏博², 熊端锋³, 代颖¹

- [1. 上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200072;
2. 上海众联能创新能源科技股份有限公司, 上海 200336;
3. 哈兆检测技术(上海)有限公司, 上海 200435]

摘要: 依据新欧洲驾驶循环工况, 以减小电机中高速运行区间的铁耗为目标, 对车用永磁同步电机(PMSM)的铁耗进行分析和优化。以一台额定功率 35 kW 的新能源汽车驱动用 PMSM 为对象, 从电机成本和加工难度角度出发选择转子开辅助槽优化电机的铁耗; 对比分析车用电机不同工况下的气隙磁密谐波含量, 结合定子特征点处磁密轨迹的观测, 分析高速磁场畸变对铁耗的影响; 通过转子开辅助槽设计减小气隙磁密谐波, 降低涡流损耗, 优化齿顶铁损密度; 优化后电机铁损最大可减小 16%。通过负载试验验证了理论分析的正确性。

关键词: 车用电机; 永磁同步电机; 铁耗; 辅助槽; 磁密轨迹

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2021)09-0096-07

doi: 10.12177/emca.2021.073

Analysis and Optimization of Stator Iron Loss of Permanent Magnet Synchronous Motor for Vehicle

WANG Haiyan¹, JIANG Zhenglong², CHAO Pengbo², XIONG Duanfeng³, DAI Ying¹

- [1. School of Mechatronics Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China;
2. Sina New Chance New Energy Technology Co., Ltd., Shanghai 200336, China;
3. Hanzhao Inspection Technology (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 200435, China]

Abstract: Based on the new European driving cycle, a new optimization method is proposed to reduce the iron loss of the permanent magnet synchronous motor (PMSM) in the medium and high speed working range. A PMSM for new energy vehicle drive with a rated power of 35 kW is taken as the object. Firstly, considering motor cost and processing difficulty, auxiliary slots on the rotor are used to optimize the iron loss of the motor. Then, through the comparison of the harmonic contents of the air gap magnetic density under different working conditions and the observation of the magnetic density trajectory at the characteristic points of the stator, the effect of high-speed magnetic field distortion on the iron loss is fully analyzed. Furthermore, to reduce the motor iron loss, reasonable slots are designed, which can effectively cut down the air gap magnetic density harmonics, reduce eddy current loss, and optimize the iron loss density at the tooth tip. After optimization, the measured motor iron loss is reduced by up to 16%. Finally, load experiment illustrates that the proposed optimization method can achieve better performance.

Key words: vehicle motor; permanent magnet synchronous motor (PMSM); iron loss; auxiliary slot; magnetic density trajectory

收稿日期: 2021-05-22; 收到修改稿日期: 2021-07-15

作者简介: 王海燕(1990—), 女, 硕士研究生, 研究方向为新能源车用电机设计及热分析。

江郑龙(1987—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为新能源汽车驱动电机设计。

晁鹏博(1989—), 男, 工程师, 研究方向为新能源汽车电驱动系统应用技术。

0 引言

在车载动力电池未能取得突破的情况下,提高驱动电机的效率对提高车辆续航里程至关重要^[1]。目前中国电动汽车续航里程认证标准 GB/T 18386—2005《电动汽车能量消耗率和续航里程实验方法》主要参考新欧洲驾驶循环(NEDC)工况。文献[2]中提出车用电机在低负荷中高速运行范围内的效率提高对于延长车辆续航里程至关重要。文献[3]揭示采用非晶合金铁心材质的电机比硅钢片电机铁耗更低、效率更高。文献[4]研究铁心硅钢片的厚度对铁耗的影响。新能源汽车行业在日趋激烈的竞争下,选用低成本原材料。降低电机成本是必须考虑的问题。

文献[5]引入铁耗系数计及制造工艺对铁耗的影响,并对电机进行优化设计。文献[6]通过采用偏移非对称转子极的方法,可同时有效抑制电磁转矩、磁阻转矩和齿槽转矩的脉动,但制造工艺复杂。文献[7]通过对转子辅助槽位置和尺寸的优化来抑制空载铁耗,得出开辅助槽对“V型”转子结构电机空载铁耗影响比较大,对“V一型”转子结构电机空载铁耗影响很小,但未考虑电机负载运行时,辅助槽对铁耗的影响规律。本文从考虑电机成本和加工难度角度出发,研究采用转子开辅助槽抑制车用电机的定子铁耗。

1 铁耗模型及辅助槽设计分析

1.1 铁耗分离计算模型

本文基于 Bertotti 铁耗分离计算模型,分析永磁同步电机(PMSM)的铁耗,考虑磁化方式的铁耗计算公式^[8]为

$$\begin{cases} P_{Fe} = P_h + P_e + P_a \\ P_h = k_h f B_m \\ P_e = k_e f^2 \int_0^{2\pi} \left(\frac{dB(\theta)}{d\theta} \right)^2 d\theta \\ P_a = k_a f^{1.5} \int_0^{2\pi} \left| \frac{dB(\theta)}{d\theta} \right|^{1.5} d\theta \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_{Fe} 为铁耗; P_h 、 P_e 、 P_a 分别为磁滞损耗、涡流损耗、异常损耗; k_h 、 k_e 、 k_a 分别为磁滞损耗系数、涡流损耗系数、异常损耗系数; f 为交变磁场频率; B_m 为磁密正弦波幅值; $B(\theta)$ 为磁场密度。

电机实际运行时,磁化方式主要分为2种:

- (1)磁化方向不变,大小按正弦规律变化的交变磁化;
- (2)磁化方向、大小均随时间变化的旋转磁化。

本文电机硅钢片的型号为35WW250,其厚度为0.35 mm,密度7 600 kg/m³,在不同频率下的铁耗B-P曲线如图1所示。有限元法拟合得到多频率下的损耗系数分别为磁滞损耗系数61.68 W/m³,涡流损耗系数1.01 W/m³,异常损耗忽略不计^[9]。

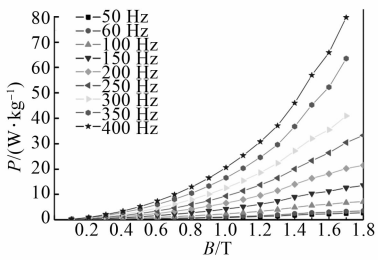


图1 35WW250在不同频率下的铁耗B-P曲线

1.2 样机参数

本文以一台新能源商务汽车用PMSM为研究对象,电机的主要参数如表1所示。

表1 电机主要参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
极数	6	槽数	36
额定转速/(r·min ⁻¹)	3 000	最高转速/(r·min ⁻¹)	8 000
额定功率/kW	35	峰值功率/kW	70
定子外径/mm	205	铁心长度/mm	132

电机转子永磁体采用内置式“V一型”结构,依据磁密分布特点分4个区域对定子铁心损耗进行分析^[10]。4个区域分别为齿顶、齿身、齿根、轭部,如图2所示,且在各区域上取4个特征点A、B、C、D。

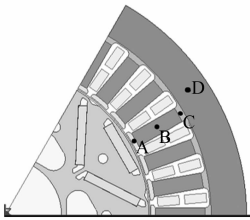


图2 电机结构及定子特征点分布示意图

1.3 辅助槽对电机铁耗的影响

转子表面开辅助槽设计能改善气隙磁密波形

的正弦度、减小气隙磁密的谐波含量,从而降低电机铁损。同时,合理的开槽设计能减小漏磁,增大气隙磁通量,提高电磁转矩,降低转矩波动。本文辅助槽的槽型设计为三角形,在 d 轴对称的两侧位置各开一个辅助槽,如图3所示,对辅助槽的3个变量(张角 θ 、深度 d_s 、单边辅助槽与 q 轴之间的位置角 α)进行参数化分析,研究辅助槽尺寸对电机铁耗和输出转矩的影响。考虑转子结构强度,初步选定辅助槽的张角 θ 为 $110^\circ \sim 160^\circ$,深度 d_s 为 $0.6 \sim 1.6$ mm,位置角 α 为 $7^\circ \sim 13^\circ$ 。

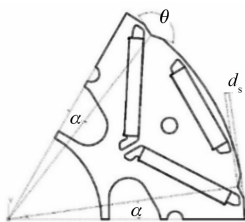
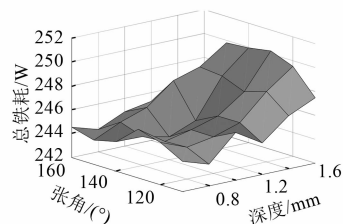


图3 转子辅助槽的尺寸参数示意图

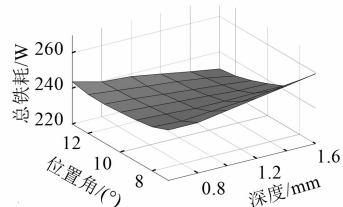
借助高配置的工作站,采用多变量变化分析辅助槽尺寸及位置对电机性能的影响和确认最终尺寸及位置参数。现采用双变量变化揭示辅助槽尺寸与电机铁耗、转矩性能的关系。

额定转速 $3\,000$ r/min、 $\alpha=8^\circ$ 时辅助槽张角和深度对铁耗的影响如图4(a)所示,其中总铁耗最大值为 250 W、最小值为 244 W,即差值为 6 W。 $\theta=140^\circ$ 时辅助槽的位置角和深度对铁耗的影响如图4(b)所示,其中总铁耗最大值为 259 W,最小值为 230 W,差值为 29 W。由此可知,辅助槽不同尺寸位置参数对 $3\,000$ r/min下电机铁耗的影响较小,其中位置角对铁耗影响稍大。定子铁耗约占总铁耗的 93% ,随辅助槽尺寸变化的趋势与总铁耗类似。

峰值转速 $8\,000$ r/min时, $\alpha=8^\circ$ 时辅助槽张角和深度对铁耗的影响如图5(a)所示,其中总铁耗最大值为 680 W、最小值为 524 W,即差值为 156 W;总体上,铁耗随张角的增大先增大再减小,铁耗随深度的增大先减小再增大。 $\theta=140^\circ$ 时辅助槽的位置角和深度对铁耗的影响如图5(b)所示,其中总铁耗最大值为 729 W、最小值为 500 W,差值为 229 W;铁耗随位置角的增大先减小再增大,在位置角 $\alpha=8^\circ \sim 9^\circ$ 时,铁耗相对较小。定子铁耗约占总铁耗的 85% ,其随辅助槽尺寸变



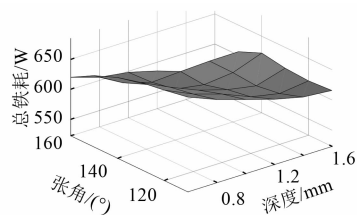
(a) 张角和深度对总铁耗的影响



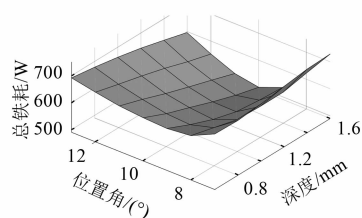
(b) 位置角和深度对总铁耗的影响

图4 转速 $3\,000$ r/min时辅助槽尺寸对总铁耗的影响

化的趋势与总铁耗类似。由数据分析可知,电机高速运行时,辅助槽的尺寸尤其是位置角的变化对电机铁耗影响非常大。



(a) 张角和深度对总铁耗的影响



(b) 位置角和深度对总铁耗的影响

图5 转速 $8\,000$ r/min时辅助槽尺寸对总铁耗的影响

峰值转速 $8\,000$ r/min时,辅助槽张角和深度对电机转矩性能的影响如图6所示,其中电磁转矩变化范围为 $38.9 \sim 44.5$ N·m,随辅助槽张角和深度的增大而减小;转矩波动变化范围为 $3.4 \sim 14.7$ N·m,随着辅助槽张角和深度的增大先减小再增大。

根据图5(a)和图6,电机在辅助槽 $\theta=160^\circ$ 和 $d=1.6$ mm时铁耗最小,为 524 W,但该尺寸下电磁转矩最小(39 N·m),转矩波动最大(12 N·m);

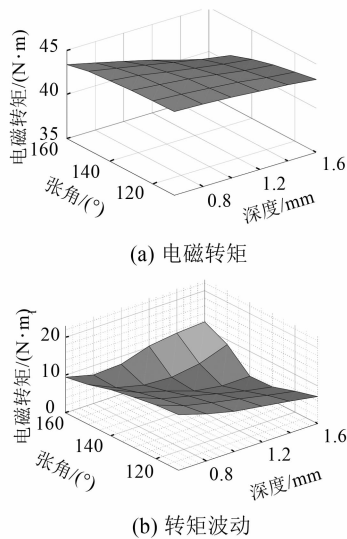


图6 辅助槽张角和深度对转矩性能的影响

在 $\theta=140^\circ$ 和 $d=1.2\sim1.6\text{ mm}$ 时转矩波动较小 ($3.4\sim4.5\text{ N}\cdot\text{m}$), 其中电磁转矩随 d_s 增大而减小。峰值转速 $8\,000\text{ r/min}$ 时, 辅助槽位置角和深度对电机转矩性能的影响如图7所示, 其中电磁转矩变化范围为 $39.3\sim44.4\text{ N}\cdot\text{m}$, 电磁转矩随着深度的增大总体呈减小趋势, 随位置角的增大先减小再增大; 转矩波动变化范围为 $3.4\sim28.9\text{ N}\cdot\text{m}$, 转矩波动在 $d_s=1.2\sim1.6\text{ mm}$ 和 $\alpha=8^\circ$ 时较小 ($3.3\sim4.5\text{ N}\cdot\text{m}$)。

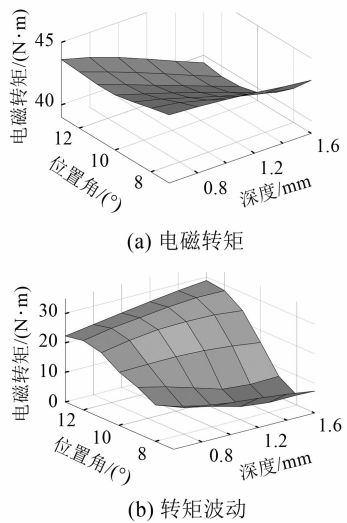


图7 辅助槽位置角和深度对转矩性能的影响

综合考虑电机的铁耗和转矩特性, 确定辅助槽深度 $d=1.2\text{ mm}$, 张角 $\theta=140^\circ$, 位置角 $\alpha=8^\circ$ 。

2 定子铁耗分析

为方便分析转子辅助槽对电机铁耗的影响, 设电机转子未开辅助槽设计为方案一, 电机转子开辅助槽设计为方案二。由前文可知不同转速下定子铁耗占总铁耗的90%左右, 下面详细研究辅助槽对定子铁耗的影响。

2.1 不同工况下气隙磁密分析

样机带负载工作时, 电机铁心中的损耗大部分是由空载磁场决定的, 因为电机主磁场由永磁体提供, 负载电流所产生的电枢磁场相对于永磁磁场较小。车用电机高速运行时, 会通过增大弱磁电流 i_d 抵消部分永磁体磁场、减小气隙磁密来维持电机端电压平衡, 即在高速运行时电机采用的弱磁控制方式是通过电枢反应达到恒功率扩速运行的目的, 弱磁程度越高, 电枢反应越大^[11]。图8为电机 $8\,000\text{ r/min}$ 时空载和额定负载的气隙磁密波形及傅里叶分解。

空载运行时, 方案一气隙磁密谐波含量为19.1%, 方案二为16.2%, 降低了3.1%; 额定负载运行时, 电枢反应导致气隙磁密畸变严重, 其中方案一谐波含量为64.2%, 方案二为52.9%, 降低了11.3%。根据式(1)可以定性预测谐波含量越低铁耗越低, 尤其是铁耗中的涡流损耗。表2为电机在空载和额定负载工况运行时的定子铁耗。空载运行时, 方案二气隙磁密基波幅值虽然大于方案一, 但高次谐波幅值大多小于方案一, 空载时损耗比方案一降低了20 W。负载运行时, 2种方案气隙磁密基波幅值相等, 但方案二谐波幅值在大于3次后皆低于方案一, 铁耗降低了96 W, 改善了电机高速运行时的效率及温升情况。

表2 空载和额定负载的定子铁耗 W		
工 况	方案一	方案二
空载	696	676
额定负载	609	513

2.2 定子铁耗分布情况

2.2.1 定子不同区域的铁耗

峰值转速 $8\,000\text{ r/min}$ 时, 方案一和方案二定子铁心在不同区域的铁耗分布占比如表3所示。由表3可知, 方案二较方案一铁耗降低了16%; 开辅助槽设计主要降低了定子齿顶、齿身处的损耗,

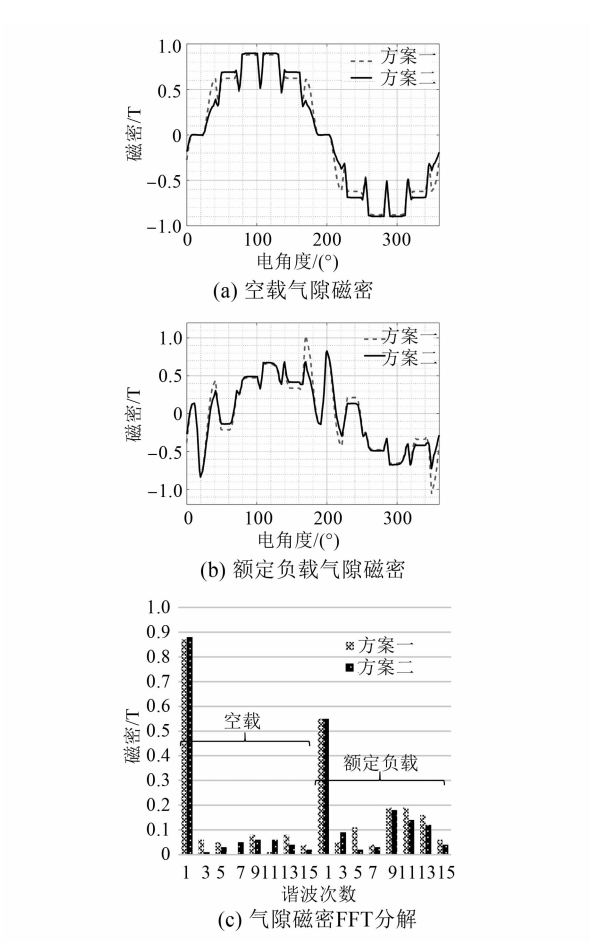


图8 8 000 r/min 时气隙磁密

在齿顶和齿身处方案二比方案一的铁耗共降低了79.5 W,占定子铁耗降低值的83%,其中方案二的齿顶百分比下降1.8%。

表3 2种方案定子不同区域的铁耗分布		
参数	方案一	方案二
定子铁耗/W	609	513
齿顶铁耗占比/%	19.1	17.3
齿身铁耗占比/%	51.4	50.9
齿根铁耗占比/%	7.3	7.3
轭部铁耗占比/%	22.3	24.6

齿身和轭部铁耗大,但同时体积也大。各区域按铁耗密度从大到小排序为:齿顶、齿根、齿身、轭部。受齿槽效应影响,电机齿部位置磁场波形畸变要高于轭部位置,其中齿顶位置磁密畸变最严重。图9为定子某齿中间线位置某一时刻的铁耗分布曲线,方案二明显改善了齿顶处的铁耗情

况,有效地规避了齿顶局部高温点的出现。

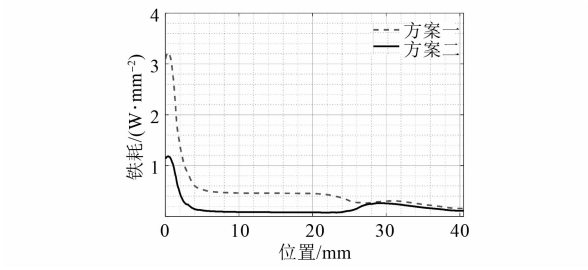


图9 定子齿中间线位置的铁耗分布曲线

图10为2种方案定子铁耗分布云图,可以看出方案二改善了齿顶和齿身处铁耗。

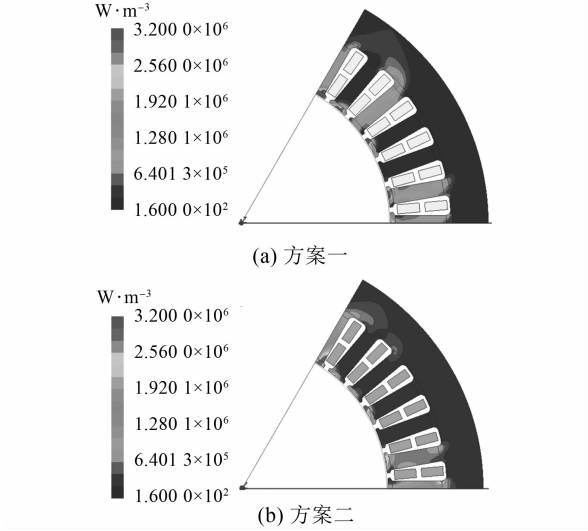


图10 2种方案定子铁耗云图

峰值转速8 000 r/min时定子的磁滞损耗和涡流损耗如表4所示。由表4可知:涡流损耗是铁耗主要成分;方案二的涡流损耗相对于方案一降低了92 W,为铁耗降低值的93.8%,同时,涡流损耗与电机频率的2次方有关,随着转速的增加,涡流损耗改善的趋势会更加明显。

表4 2种方案下磁滞损耗和涡流损耗			W
定子铁耗	方案一	方案二	
磁滞损耗	39	36	
涡流损耗	570	478	

2.2.2 定子特征点的磁化方式

采用时步有限元方法分析得到2种方案下,电机在正弦波电流源供电时定子各特征点磁密变化情况,如图11所示。齿身B点的磁场可以认为

是纯粹的交变磁场;齿身 A 点、齿根 C 点的磁场中旋转磁场占较大比重;齿根 D 点的磁场中交变磁场占很大比重,且以切向磁化为主。

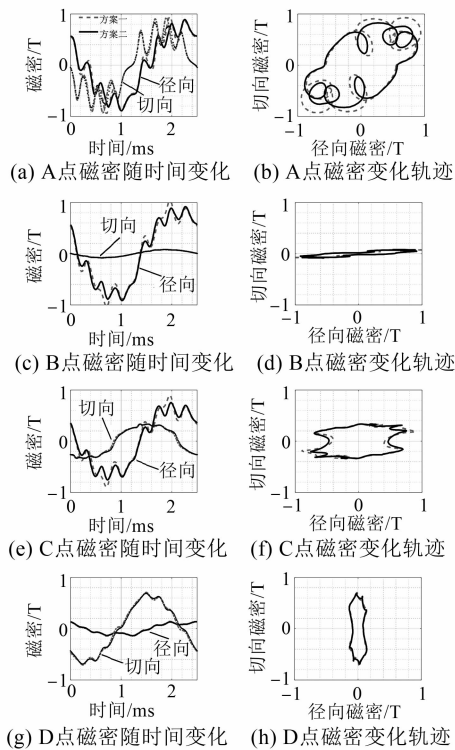


图 11 转速 8 000 r/min 时定子特征点处的磁化方式

在选定电机硅钢片型号后,铁耗由磁密幅值和频率决定。表 5 为特征点处磁密的基波幅值和谐波含量,其中方案二的某点基波磁密幅值相比方案一减小的最大值为 0.02 T,THD 减小值为 4.0%~5.3%,8 000 r/min 时基波频率 $f=400$ Hz,考虑谐波频率是基波的倍频数且铁耗与频率的 1~2 次方有关,故谐波含量下降是铁耗减小的主要原因。通过 2 种方案在特征点处的谐波分析可知 2 种方案下各点分布规律没有变化,但方案二改善了铁心的磁密谐波含量,尤其是齿顶 A 点处。

2.3 电机转速与铁耗的关系

车用驱动电机对电磁振动噪声要求指标高。为进一步消除齿谐波,经过理论分析和有限元仿真可知定子斜槽一个齿距对齿槽转矩抑制效果最好^[12]。定子斜槽示意图如图 12(a)所示。设电机转子开辅助槽加定子斜槽设计为方案三。电机 3 种方案的齿槽转矩如图 12(b)所示。电机经过本体结构优化,齿槽转矩最大值由方案一的

1.15 N·m 下降为方案二 0.37 N·m、方案三 0.22 N·m,且方案三中齿槽转矩呈现正弦波脉动,有利于削弱电磁振动噪声。

表 5 2 种方案特征点基波幅值和谐波含量

特征点	方案一		方案二	
	基波幅值/T	THD/%	基波幅值/T	THD/%
A 点径向	0.76	29.5	0.75	24.2
A 点切向	0.68	37.0	0.66	32.1
B 点径向	0.87	23.8	0.86	20.0
B 点切向	0.08	4.8	0.08	3.9
C 点径向	0.71	26.3	0.69	21.6
C 点切向	0.35	15.5	0.35	14.5
D 点径向	0.12	28.6	0.12	28.6
D 点切向	0.65	8.4	0.64	8.0

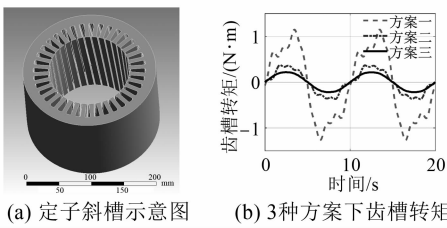


图 12 定子斜槽改善齿槽转矩

为分析定子斜槽是否对定子铁耗产生影响,图 13 给出了 3 种方案下铁耗随转速增加的变化趋势图,其中为考虑逆变器引入的电流时间谐波对铁耗的影响,在电流源激励上叠加了 1 倍和 2 倍开关频率的主要谐波^[13]。

由图 13 可知:方案二和方案三的定子铁耗在电机不同转速下几乎相同,其中,8 000 r/min 时方案三比方案二多 16 W,占总定子铁耗 2.5%,可知斜槽会导致铁耗增加,但影响很小,可忽略不计;随着转速的增加,辅助槽设计对铁耗的优化效果更加明显,即电机中高速运行时铁耗降低、效率提高。

3 试验结果与分析

本文试验电机结构设计采用转子开辅助槽加定子斜槽来满足车用驱动电机的性能指标要求。转子开辅助槽结构的实物图如图 14(a)所示,图 14(b)为试验现场图。

图 15 为电机负载试验实测得到的效率 MAP

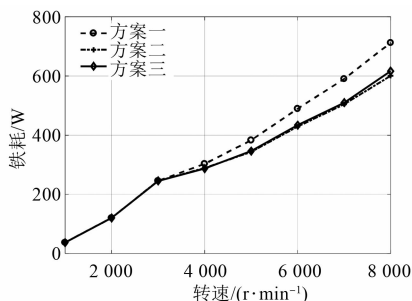


图 13 定子铁耗随转速变化曲线

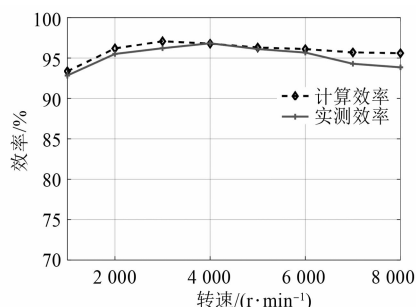


图 16 额定功率下效率对比曲线

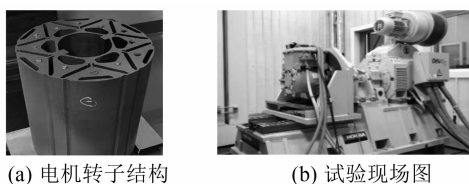


图 14 电机实物图

图。电机负载最高驱动效率可达 96.8%，2 000~6 000 r/min 工作转速区间的驱动效率平均为 96%，电机高效工作区间（效率>85%）占比为 92%，说明该结构电机在宽调速范围内可高效运行，满足车用电机实际工况需求。

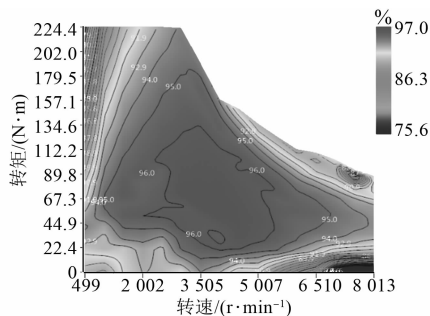


图 15 电机实测效率 MAP 图

图 16 为额定功率下电机计算效率与实测效率对比图，电机损耗主要包括铁耗、铜耗、机械损耗，其中电机铜耗根据实测电流和实测电阻值计算得到。计算效率和实测效率的最大差值为 1.75%，验证了理论分析的正确性。

4 结 语

本文以一台内置式“V 一型”转子结构车用 PMSM 为研究对象，在铁耗分离计算模型的基础上，通过有限元法分析转子辅助槽对电机铁耗的影响，得到以下结论：(1)合理的转子辅助槽设计

可以改善气隙磁密，降低铁耗，提高输出转矩，抑制转矩脉动；(2)电机在额定负载高速运行时，电枢反应会导致气隙磁密畸变严重，转子辅助槽设计可以降低约 16% 气隙谐波含量；(3)转子辅助槽设计可以降低定子磁密波形的谐波含量、降低涡流损耗，尤其是齿顶处；(4)随着转速的增加，辅助槽设计对铁耗的优化程度更加明显。

【参考文献】

- [1] CHEN L, WANG J, LAZARI P, et al. Optimizations of a permanent magnet machine targeting different driving cycles for electric vehicles [C] // Proceedings of the 2013 International Electric Machines & Drives Conference, 2013: 855.
- [2] 史俊旭, 陈致初, 符敏利, 等. 电动汽车用永磁同步电机 NEDC 工况下效率优化方法[J]. 控制与信息技术, 2019(1): 50.
- [3] 王凯东, 杨文龙. 非晶合金电机空载铁耗研究[J]. 电机与控制应用, 2018, 45(10): 89.
- [4] 王晓远, 秦庆雷, 王耕籍. 转子结构对高速永磁电机转子损耗影响分析[J]. 微电机, 2016, 49(6): 1.
- [5] 田乐, 吴立建, 黄晓艳, 等. 内置式永磁同步电机铁耗对电动汽车续航里程优化的影响分析[J]. 微电机, 2019, 52(1): 1.
- [6] CHEN Q, XU G, LIU G, et al. Torque ripple reduction in five-phase interior permanent magnet motors by lowering interactional MMF [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(11): 8520.
- [7] 沈启平. 车用高功率密度永磁同步电机的研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2012.
- [8] 张微, 万彦辉, 王卿, 等. 高功率密度永磁无刷直流电机铁耗计算分析[J]. 微电机, 2016, 49(7): 17.

(下转第 109 页)

5 结 语

通过对某地铁永磁同步电机开展振动噪声测试及特性分析,得到以下结论:

(1) 200 ~ 800 r/min 的平均噪声近似从 55.7 dB(A) 线性增加至 72.8 dB(A), 800 ~ 2 000 r/min 的平均噪声在 73 dB(A) 附近, 2 000 ~ 3 200 r/min 的平均噪声变化趋势呈现波动, 2 400 r/min 和 3 200 r/min 处存在的峰值噪声分别为 79.1 dB(A) 和 81.4 dB(A)。

(2) 电机噪声主要由电磁振动产生, 加速过程的主要频谱成分包括 48 阶、56 阶和 104 阶等阶次成分和以开关频率(2 000 Hz)及其倍频为中心的调制成分, 减速过程无开关频率作用, 其余阶次成分一致。

(3) 电机在 316、440、910 Hz 等频率处存在局部模态, 在电机阶次激励作用下易引发共振, 导致噪声在起动过程中存在较大波动。

【参 考 文 献】

- [1] 冯江华. 高速动车组永磁同步牵引系统的研制[J]. 机车电传动, 2016(4): 1.
- [2] 张道禄, 晏才松. 下一代地铁车辆 TQ-250 永磁同步牵引电机研制[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(11): 50.
- [3] 贾喜琴, 许勇, 李广, 等. 高速动车组大功率永磁牵引电机研制[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(9): 51.
- [4] GIERAS J F, WANG C, LAI J C. Noise of polyphase electric motors [M]. Boca Raton: CRC Press, 2006.
- [5] 韩雪岩, 李春雷, 张新刚, 等. 永磁辅助同步磁阻电机振动噪声准解析计算及影响因素分析[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(11): 1.

- [6] 付敏, 邓佳慧, 于静, 等. U 型单相自起动永磁同步电机电磁振动与噪声分析[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(6): 64.
- [7] 李晓华, 赵容健, 田晓彤, 等. 逆变器供电对电动汽车内置式永磁同步电机振动噪声特性影响研究[J]. 电工技术学报, 2020, 35(21): 4455.
- [8] 王晓远, 贺晓钰, 高鹏. 电动汽车用 V 型磁钢转子永磁电机的电磁振动噪声削弱方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(16): 4919.
- [9] BESNERAIS L J. Vibroacoustic analysis of radial and tangential air-gap magnetic forces in permanent magnet synchronous machines [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(6): 8105609.
- [10] 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.
- [11] LIN F, ZUO S, DENG W, et al. Modeling and analysis of electromagnetic force, vibration and noise in permanent magnet synchronous motor considering current harmonics [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(12): 7455.
- [12] 肖阳, 宋金元, 屈仁浩, 等. 变频谐波对电机振动噪声特性的影响规律[J]. 电工技术学报, 2021, 36(12): 2607.
- [13] ZHAO W, WANG X, CHRIS G, et al. Multi-physics and multi-objective optimization of a high speed PMSM for high performance applications [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2018, 54(11): 8106405.
- [14] 相龙洋, 左曙光, 何吕昌, 等. 电动汽车及其驱动永磁电机声振特性试验[J]. 振动测试与诊断, 2014, 34(1): 90.
- [15] 张长庚, 杨庆新, 李永建. 硅钢叠片在宽频三轴正交激磁条件下的磁特性模拟方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(7): 2167.

(上接第 102 页)

- [9] 江善林. 高速永磁同步电机的损耗分析与温度场计算[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [10] 戈宝军, 罗前通, 王立坤, 等. 高速永磁同步电动机铁耗分析[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(4): 32.
- [11] 蔡土添, 赵国新. 车用永磁同步电动机的铁耗分析与效率优化[J]. 电机技术, 2020(1): 11.

- [12] 杨志豪, 杨梦雪, 王思诺, 等. 定子斜槽对永磁同步电动机性能的影响[J]. 电气工程学报, 2019, 14(3): 97.
- [13] 靳荣华, 师蔚. 多因素影响下永磁电机定子铁耗计算[J]. 微特电机, 2019, 47(6): 16.