

文章编号: 2097-1974(2024)05-0075-06

DOI: 10.7654/j.issn.2097-1974.20240511

# 特种车辆轮毂电机铁心损耗计算研究

刘浩, 吴学雷, 李洪彪, 白锦洋, 张冉  
(北京航天发射技术研究所, 北京, 100076)

**摘要:** 铁心损耗在特种车辆轮毂电机损耗中占据较大比例, 直接影响驱动系统的效率和温升。为准确计算铁心损耗, 以一台额定功率 70 kW 的轮毂电机为研究对象, 通过时步有限元分析得到定子铁心各个区域的磁密波形, 并分别对径向磁密、切向磁密波形进行谐波分析, 进而研究旋转磁化和谐波磁场对轮毂电机定子铁耗的影响。在进行磁密波形及其谐波分析后, 采用 3 种铁耗计算方法分别计算轮毂电机定子铁耗, 从轮毂电机效率及损耗试验数据中分离出定子铁耗值, 并与不同方法的计算结果进行比对分析, 结果表明同时考虑旋转磁化及谐波磁场影响的计算方法精度最高, 其计算结果与试验值最相近, 验证了计算方法的有效性。

**关键词:** 特种车辆; 轮毂电机; 时步有限元分析; 铁耗; 旋转磁场

中图分类号: U469.72; V554

文献标识码: A

## Research on Calculation of Iron Losses of In-wheel Motor for Special Vehicle

LIU Hao, WU Xuelei, LI Hongbiao, BAI Jinyang, ZHANG Ran  
(Beijing Institute of Space Launch Technology, Beijing, 100076)

**Abstract:** Iron loss occupies a large proportion of the losses of in-wheel motor for special vehicle, which directly affects the efficiency and temperature rise of the drive system. In order to accurately calculate the iron loss, time-stepping finite element analysis is adopted to analyze the flux density waveforms at different regions of the stator core by taking the in-wheel motor with rated power of 70 kW for example. Harmonic analysis of radial and tangential flux density waveforms at different regions of the stator core is carried out. The impact of rotating magnetic field and harmonic component on the stator iron loss is further studied. Three different iron loss calculation methods are adopted to calculate the stator iron loss after the flux density waveforms and harmonic analysis are carried out. The stator iron loss values separated from the efficiency and loss test of the in-wheel motor are compared with the calculation values of different calculation methods. The results show that the calculation method in consideration of the effect of rotating magnetic field and harmonic component has the highest accuracy and its calculation result is the closest to the test result, which verifies the validity of the calculation method.

**Keywords:** special vehicle; in-wheel motor; time-stepping finite element analysis; iron loss; rotating magnetic field

## 0 引言

特种车辆轮毂电机具有扭矩大、体积小等特点, 电机绕组、定转子等部件的热源密度大, 散热条件恶劣, 工作时温升较高。轮毂电机温升超过使用极限会使永磁体产生退磁, 并大幅降低电机绝缘系统的使用寿命, 对驱动系统的可靠性和功率输出造成影响。铁心损耗在轮毂电机的功率损耗中占比较大, 直接影响电驱动系统的温升、效率和可靠性。因此, 精确计算铁心损耗对于轮毂电机温度场分析和驱动系统效率提升十分关键。

目前, Bertotti 铁耗计算模型在电机铁耗计算中应用较为广泛。然而经典 Bertotti 铁耗模型在计算由逆变器供电且调速范围较广的永磁同步电机铁耗时有较大误差。因此, 国内外学者基于 Bertotti 铁耗模型, 提出了一系列改进铁耗计算方法。Fiorillo 等<sup>[1]</sup> 针对谐波磁场的铁耗提出了改进铁耗计算模型, 但该模型忽略了旋转磁化的影响。黄允凯等<sup>[2]</sup> 提出了用两个正交方向的交变磁化等效旋转磁化的计算方法。文献 [3]、文献 [4] 分析了定子铁心不同位置的磁密轨迹, 研究了旋转磁化对铁耗的影响, 但对谐波磁场铁耗并未作具体分析。文献 [5] 提出了变系数铁耗

计算模型,该模型考虑了趋肤效应以及铁心旋转磁场的影响,经试验验证,该模型的计算精度可满足工程应用需求。文献[6]研究了定子磁密及铁耗分布规律,较为详细地说明了谐波磁场及旋转磁场对铁耗计算的影响,对定子铁耗进行了有限元仿真计算并和理论计算结果进行了对比,但文中仿真和计算结果缺乏试验验证。

本文在上述研究成果基础上,以一台额定功率70 kW的特种车辆轮毂电机为研究对象,对轮毂电机定子典型区域的磁通密度、径向磁密和切向磁密进行了分析,分别计算了轮毂电机定子各区域基波及谐波铁耗密度,采用3种方法计算了铁耗值,并依据轮毂电机效率测试数据分离出铁耗试验值。通过对比分析计算结果和试验结果,验证了铁耗计算方法的有效性。

## 1 永磁电机铁耗计算模型

### 1.1 Bertotti铁耗计算模型

由Bertotti铁耗计算模型可知铁耗由磁滞损耗、涡流损耗、附加损耗组成<sup>[7-8]</sup>,表达式为

$$P_{Fe} = P_h + P_c + P_e \quad (1)$$

$$P_h = k_h f B_m^x \quad (2)$$

$$P_c = \frac{\sigma d^2}{12\rho T} \int_0^T \left[ \frac{dB(t)}{dt} \right]^2 dt \quad (3)$$

$$P_e = \frac{\sqrt{\sigma G V_0 S}}{\rho} \frac{1}{T} \int_0^T \left| \frac{dB(t)}{dt} \right|^{1.5} dt \quad (4)$$

式中  $P_{Fe}$  为铁心损耗;  $P_h$  为磁滞损耗;  $P_c$  为涡流损耗;  $P_e$  为附加损耗;  $k_h$ ,  $x$  为磁滞损耗系数;  $f$  为电频率;  $B_m$  为磁密幅值;  $\sigma$  为铁心电导率;  $d$  为硅钢片厚度;  $\rho$  为铁心密度;  $T$  为磁通密度变化周期;  $B(t)$  为磁通密度随时间变化情况;  $G$ ,  $V_0$  为代表硅钢片性能的参数;  $S$  为硅钢片截面积。

当磁通密度波形为正弦时, Bertotti铁耗计算模型简化为

$$P_{Fe} = k_h f B_m^x + k_c (f B_m)^2 + k_e (f B_m)^{1.5} \quad (5)$$

式中  $k_c$  为涡流损耗系数;  $k_e$  为附加损耗系数。

目前多采用式(5)计算铁心损耗,其中的各项损耗系数一般由不同频率及磁密下的硅钢片铁耗测试数据拟合得到。

永磁同步电机铁心磁场中同时存在旋转磁场、交变磁场,铁心中的磁密波形不是正弦变化,谐波含量较大。采用逆变器供电使得电流中存在较多时间谐波,电流时间谐波也会使磁密波形谐波含量增加,进

一步增加铁心损耗。由于忽略了旋转磁场及磁密谐波分量的影响,基于磁密波形正弦变化假设的简化Bertotti铁耗计算模型在计算永磁同步电机铁耗时会产生较大的误差。

### 1.2 考虑旋转磁化和谐波的铁耗计算模型

为了准确计算轮毂电机的铁耗,将电机中任一点的磁密波形进行傅里叶变换,得到磁密基波和各次谐波分量。分别计算基波产生的铁耗和各次谐波产生的铁耗,则非正弦磁密波形引起的铁耗为基波磁密和各次谐波磁密产生的铁耗之和<sup>[9]</sup>。为考虑旋转磁化的影响,将磁密波形分解为径向、切向磁密,再分别对径向、切向磁密进行傅里叶变换,分别计算径向磁密基波和谐波铁耗、切向磁密基波和谐波铁耗,则总铁耗为径向磁密和切向磁密产生的铁耗之和<sup>[10]</sup>。因此,铁心磁滞损耗、涡流损耗、附加损耗计算表达式为

$$P_h = k_h \sum_{k=1}^N k f (B_{rk}^x + B_{tk}^x) \quad (6)$$

$$P_c = k_c \sum_{k=1}^N (k f)^2 (B_{rk}^2 + B_{tk}^2) \quad (7)$$

$$P_e = k_e \sum_{k=1}^N (k f)^{1.5} (B_{rk}^{1.5} + B_{tk}^{1.5}) \quad (8)$$

式中  $k$  为谐波次数;  $N$  为最高谐波次数;  $B_{rk}$  为径向磁密第  $k$  次谐波幅值;  $B_{tk}$  为切向磁密第  $k$  次谐波幅值。

由于永磁同步电机铁心不同区域磁密的幅值和变化情况不同,因此不同区域铁心损耗密度不同。通常将定子、转子铁心划分为不同区域,采用时步有限元法进行电磁场分析,提取各个区域的径向、切向磁密波形,利用式(6)~(8)计算出每个区域的单位质量铁耗,则电机总铁耗为各区域铁耗和,计算表达式如下:

$$P_i = P_{hi} + P_{ci} + P_{ei} \quad (9)$$

$$P_{Fe} = l \sum_{i=1}^n P_i \rho_i S_i \quad (10)$$

式中  $P_i$  为第  $i$  区域的单位质量铁耗;  $P_{hi}$  为第  $i$  区域的单位质量磁滞损耗;  $P_{ci}$  为第  $i$  区域的单位质量涡流损耗;  $P_{ei}$  为第  $i$  区域的单位质量附加损耗;  $l$  为铁心长度;  $n$  为划分区域数;  $\rho_i$  为硅钢片密度;  $S_i$  为铁心第  $i$  区域面积。

## 2 定子铁心磁密分析

本文研究的轮毂电机类型为永磁同步电机,部分电机参数见表1。

表1 永磁同步电机参数

Tab.1 Parameters of permanent magnet synchronous motor

参数名称	数值
额定功率/kW	70
额定频率/Hz	200
绕组类型	散嵌绕组
绕组层数	双层绕组
磁路结构	内置式

依据铁耗计算模型，计算铁心损耗首先要得到铁心各区域的磁密波形。铁心不同区域磁密分布差异较大，为了在准确计算轮毂电机铁心损耗的情况下尽量减少计算量，参考现有定子区域划分方法，对定子齿顶、齿身、齿根和轭部4个典型区域均进行细分，总共将定子铁心一个齿宽区域划分为12个区域，如图1所示。

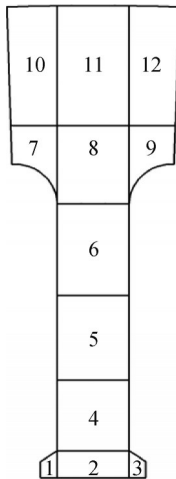


图1 定子铁心区域划分

Fig.1 Region division of stator core

在每个区域选取一点以代表相应区域的磁通密度，基于 ANSYS Maxwell 采用时步有限元法对各个区域的磁密波形进行分析。轮毂电机在额定转矩和额定转速运行时，齿顶、齿身、齿根和轭部这4个典型区域内磁密变化虽有差异，但相比于齿顶与齿身、齿身与齿根等典型区域之间的差异较小，故以定子齿尖区域1、齿顶区域2、齿身区域5、齿根区域8、轭部区域11为例分析旋转磁化和谐波磁场的影响。相应区域的一个周期磁密波形及径向磁密、切向磁密波形如图2~6所示，图中  $B_r$ 、 $B_t$  分别为磁密径向分量和切向分量。

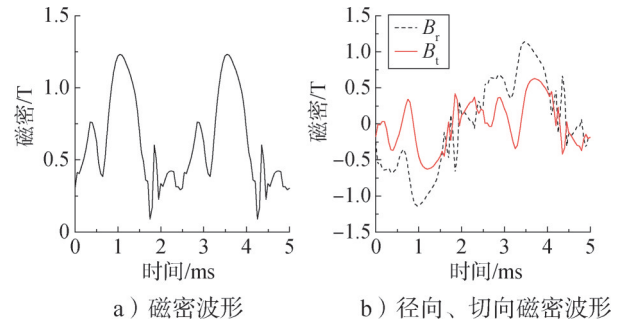


图2 区域1磁密分析

Fig.2 Flux density analysis of region 1

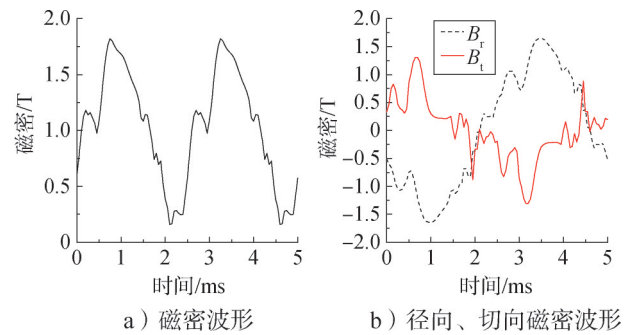


图3 区域2磁密分析

Fig.3 Flux density analysis of region 2

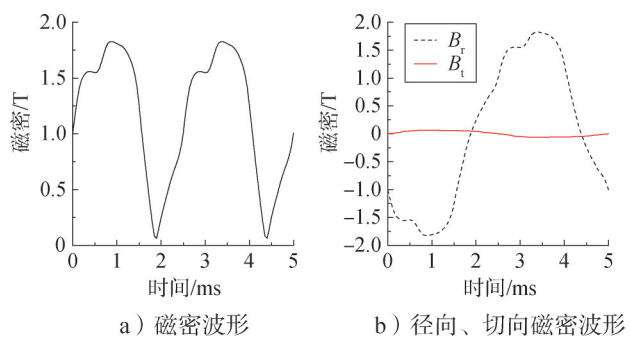


图4 区域5磁密分析

Fig.4 Flux density analysis of region 5

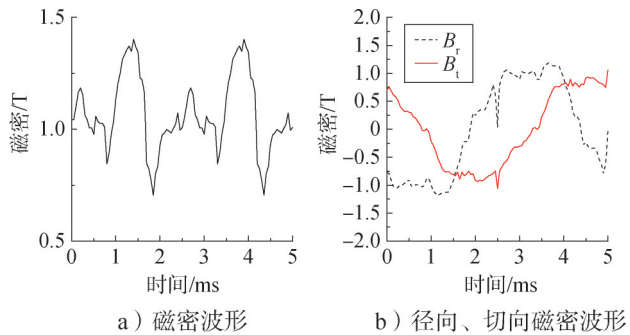


图5 区域8磁密分析

Fig.5 Flux density analysis of region 8

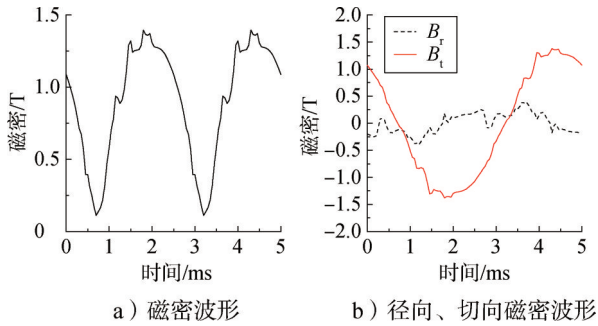


图6 区域11磁密分析

Fig.6 Flux density analysis of region 11

分析图2~6的磁密波形可知,区域1、区域2、区域8受到径向磁场和切向磁场的共同影响,区域5主要受径向磁场的影响,区域11主要受切向磁场的影响,故可以得到如下结论:定子齿尖、齿顶和齿根部位的磁密均含有比较大的径向、切向分量,受旋转磁

场影响较大,主要是旋转磁化;定子齿身部位磁密的切向分量较小,磁密径向分量占磁密的主要部分,且径向磁密波形接近正弦波,因此受旋转磁场影响较小,以交变磁化为主;定子轭部磁密的切向分量较大,径向分量较小,但也体现出一定的旋转磁化。

在图2~6中,轮毂电机定子铁心不同区域的磁密及其径向、切向分量均不是理想的正弦变化,大部分区域的谐波分量都比较大。为考虑谐波磁场对铁耗的影响,对各区域的径向、切向磁密波形进行傅里叶分解,其中定子齿尖区域1、齿顶区域2、齿身区域5、齿根区域8、轭部区域11的谐波分析结果如图7所示。

由图7看出,在不考虑电流时间谐波影响时,各区域磁密除基波外,主要含有3、5、7等奇次谐波。齿身区域谐波含量较小,齿顶、轭部交界区域谐波含量较大。

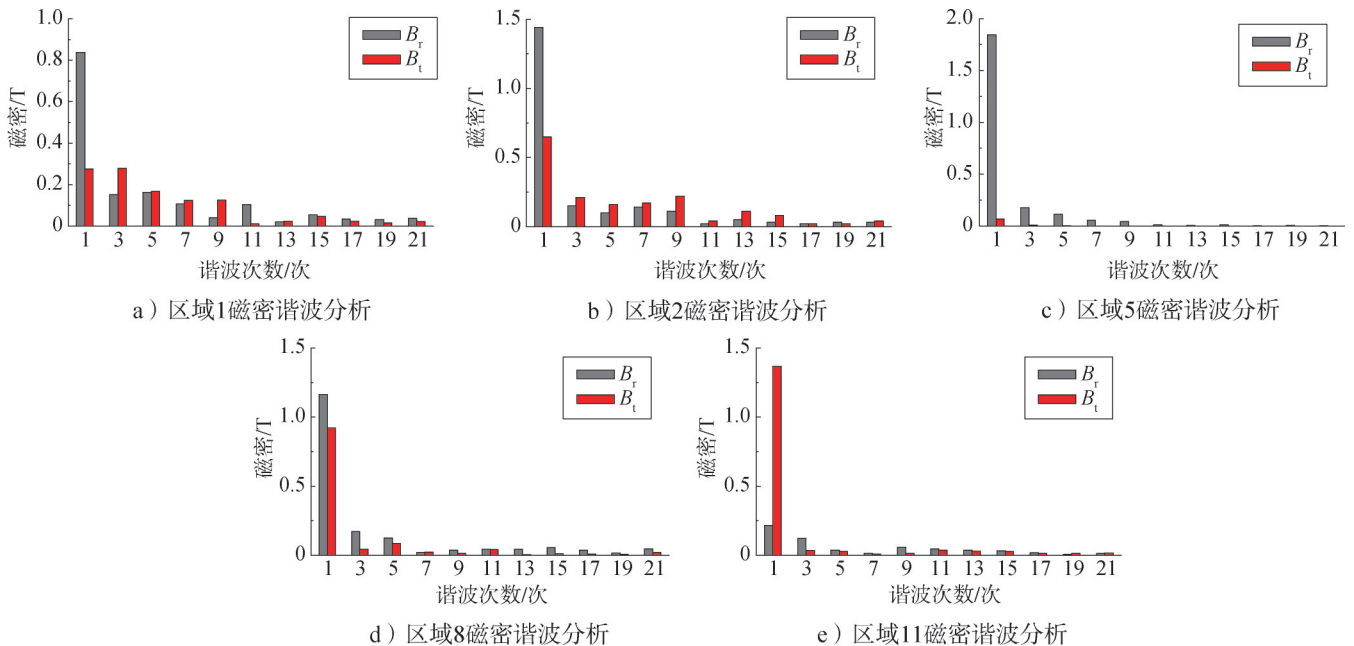


图7 定子铁心不同区域磁密谐波分析

Fig.7 Flux density harmonic analysis at different regions of stator core

### 3 定子铁心损耗计算

本文采用3种方法计算轮毂电机定子铁耗。

方法一:将轮毂电机定子各区域磁密视为正弦变化,忽略定子中旋转磁场和谐波磁场的作用,把磁密最大值和基波频率代入式(5)计算。

方法二:将各区域由磁密波形分解得到的径向磁密和切向磁密均视为正弦波,考虑旋转磁化,依据式(5)分别计算径向、切向磁密产生的铁耗。

方法三:考虑谐波磁场和旋转磁化影响,依据谐

波分析结果,将径向、切向磁密各次谐波幅值及相应频率代入式(6)~(8)中计算得到各区域铁耗密度,再依据式(9)~(10)计算总铁耗。

为具体分析谐波铁耗的影响,首先采用考虑旋转磁化和谐波磁场影响的方法三计算额定工况下轮毂电机定子铁心不同区域的基波和谐波铁耗密度,并依据区域总铁耗密度和区域面积计算出各区域铁耗占定子总铁耗的比例,结果如表2所示。对比不同区域的铁耗密度及其磁密波形可知,齿顶部位磁密幅值较大且

受旋转磁化、谐波磁场影响较大，故谐波铁耗以及总铁耗密度较大；齿顶部位面积较小，故齿顶部位铁耗占定子总铁耗比例较小。虽然齿身部位磁密幅值较大，但主要为交变磁化，且谐波含量较小，故谐波铁耗及总铁耗密度较小；齿身部位面积较大，故齿身部位铁耗占定子总铁耗比例较大。定子轭部不同区域的磁密幅值差异较大，且受旋转磁化和谐波磁场的影响程度不同，轭部不同区域谐波铁耗和总铁耗密度差异较大，其中轭部靠近槽底区域受旋转磁化和谐波磁场影响较大，铁耗密度和相应区域铁耗占定子总铁耗比例较大。由上述分析可知，定子不同区域均受到旋转磁场和谐波磁场的影响，计算铁耗时不可忽略旋转磁场和谐波磁场的影响。

表2 轮毂电机定子不同区域的铁耗密度

Tab.2 Core loss densities in different regions of in-wheel motor stator core

区域序号	基波铁耗密度/ (W·kg <sup>-1</sup> )	谐波铁耗密度/ (W·kg <sup>-1</sup> )	总铁耗密度/ (W·kg <sup>-1</sup> )	比例/ %
1	6.53	23.12	29.65	0.49
2	20.88	32.57	53.45	5.18
3	26.96	11.08	38.05	0.65
4	27.15	2.77	29.92	12.45
5	28.55	2.53	31.09	14.91
6	29.75	3.06	32.81	14.22
7	19.79	6.80	26.58	3.09
8	18.42	9.66	28.07	8.83
9	19.78	4.52	24.29	2.88
10	17.73	24.55	42.28	15.28
11	16.06	3.94	20.00	10.60
12	17.24	14.14	31.38	11.46

采用上述3种方法分别计算额定转矩下不同转速对应的定子频率的轮毂电机定子铁耗值，计算结果如表3所示。

表3 不同频率下定子铁耗计算值

Tab.3 Calculated values of stator core loss at different frequencies

频率/Hz	定子铁耗/W		
	方法一	方法二	方法三
66.67	178.77	198.69	220.19
133.33	374.68	451.95	506.35
200.00	580.06	649.55	824.88
280.00	862.40	977.33	1195.90

#### 4 轮毂电机效率试验结果及对比分析

忽略永磁体涡流损耗和转子铁耗，则轮毂电机的

功率损耗主要分为绕组铜耗、定子铁耗和机械损耗。其中，机械损耗包括电机轴承摩擦损耗和转子风摩损耗。

在轮毂电机效率测试试验中，可以测得电机电压、电流、转速、输出转矩、绕组温度及冷态直流电阻等数据，进而得到轮毂电机输入功率、输出功率，轮毂电机总损耗为输入功率和输出功率的差值。轮毂电机在额定转矩下不同定子频率的效率试验测试数据如表4所示。

表4 额定转矩下电机效率试验数据

Tab.4 Motor efficiency test data under rated torque

频率/Hz	输入功率/kW	输出功率/kW	效率/%
66.67	25.00	23.60	94.40
133.33	48.90	47.10	96.32
200.00	73.00	70.70	96.85
280.00	99.00	96.00	96.97

由于电机铁耗无法从试验中直接测得，故从测得的总损耗中分离出电机铁耗。电机机械损耗和铜耗分别用式(11)~(13)计算<sup>[11]</sup>：

$$P_z = k_m G_a n \times 10^{-3} \tag{11}$$

式中  $P_z$ 为电机轴承摩擦损耗； $k_m$ 为系数，本文取值为2； $G_a$ 为转子质量； $n$ 为转速。

$$P_f = 2D_a^3 n^3 l_s \times 10^{-6} \tag{12}$$

式中  $P_f$ 为转子风摩损耗； $D_a$ 为转子直径； $l_s$ 为转子长度。

$$P_{Cu} = m I^2 R \tag{13}$$

式中  $P_{Cu}$ 为绕组铜耗； $m$ 为相数； $I$ 为相电流； $R$ 为工作温度下的相电阻。

电机铁心损耗可由式(14)得到：

$$P_{Fe} = P_1 - P_2 - P_z - P_f - P_{Cu} \tag{14}$$

式中  $P_1$ 为电机输入功率； $P_2$ 为电机输出功率。

在额定负载转矩下，依据式(14)计算不同频率的轮毂电机定子铁耗试验值。图8为3种计算方法得出的轮毂电机定子铁耗计算值与试验值的比对分析。由图8可知，3种方法的铁耗计算值均小于试验值，随着频率的增加，计算值与试验值的差值增加。考虑旋转磁化和谐波磁场影响的方法三的计算值最接近试验值，在额定频率下，方法三的计算值和试验值之间的误差为9.51%，基本满足电机温度场分析需求。造成误差的主要原因是：从试验数据中分离铁耗时，机械损耗和绕组铜耗的计算存在误差；忽略了永磁体涡流损耗和转子铁耗，未考虑激励电流谐波对铁耗的影响；用交变磁化等效旋转磁化的计算方法与实际旋转

磁化之间也存在一定误差。

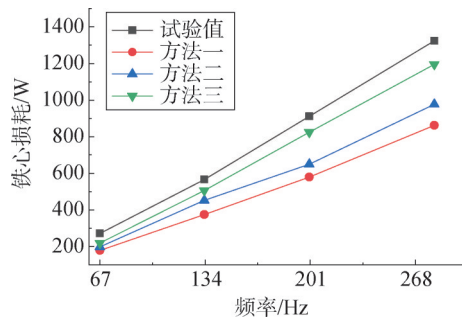


图8 不同频率下定子铁耗计算值和试验值对比

Fig.8 Comparison of calculated values and test values of stator core loss at different frequencies

## 5 结论

准确计算铁心损耗对于分析轮毂电机温度场、提高电机效率具有重要意义,本文以一台额定功率为70 kW的轮毂电机为研究对象,采用3种方法计算铁耗,并与试验值对比,得出以下结论:

a) 轮毂电机定子铁心中磁化方式与所处部位有关。齿身部位受旋转磁场影响较小,以交变磁化为主。定子齿顶部位受旋转磁化影响较大,以旋转磁化为主。定子齿根和轭部均受到旋转磁化的影响。

b) 定子齿顶部位铁耗密度较大,但由于齿顶部位面积较小,故齿顶部位产生的铁耗占定子铁耗比例较小,齿身和轭部的铁耗占定子总铁耗的比例较大。定子铁心各区域均存在基波铁耗和谐波铁耗,部分区域的谐波铁耗超过了基波铁耗。

c) 计算轮毂电机铁心损耗时若忽略磁化方式和谐波磁场的影响,则得出的结果远小于实际值。考虑谐波磁场和旋转磁场影响的铁耗计算值接近于试验结果,计算方法同样适用于其他类型的旋转电机。

## 参考文献

- [1] FIORILLO F, NOVIKOV A. An improved approach to power losses in magnetic laminations under nonsinusoidal induction waveform[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1990, 26(5): 2904-2910.
- [2] 黄允凯, 胡虔生, 朱建国. 永磁无刷直流电机铁耗计算方法[J]. 电机与控制应用, 2007, 34(4): 6-9.  
HUANG Yunkai, HU Qiansheng, ZHU Jianguo. Methods for calculating core losses in permanent magnet motors[J]. Electric Machines and Control Application, 2007, 34(4): 6-9.
- [3] 刘明基, 孙哲, 詹阳, 等. 非晶合金高速永磁电机定子铁心空载损耗的分析计算[J]. 华北电力大学学报, 2019, 46(5): 77-82.  
LIU Mingji, SUN Zhe, ZHAN Yang, et al. Calculation and analysis

of no-load stator iron loss of high-speed permanent magnet machine with amorphous alloy stator core[J]. Journal of North China Electric Power University, 2019, 46(5): 77-82.

- [4] 孔晓光, 王凤翔, 徐云龙, 等. 高速永磁电机铁耗的分析和计算[J]. 电机与控制学报, 2010, 14(9): 26-30.  
KONG Xiaoguang, WANG Fengxiang, XU Yunlong, et al. Analysis and calculation of iron losses of high-speed permanent magnet machines[J]. Electric Machines and Control, 2010, 14(9): 26-30.
- [5] 江善林, 邹继斌, 徐永向, 等. 考虑旋转磁通和趋肤效应的变系数铁耗计算模型[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(3): 104-110.  
JIANG Shanlin, ZOU Jibin, XU Yongxiang, et al. Variable coefficient iron loss calculating model considering rotational flux and skin effect[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(3): 104-110.
- [6] 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): 32-39.  
GE Baojun, LUO Qiantong, WANG Likun, et al. Analysis of iron losses of high-speed permanent magnet synchronous motor[J]. Electric Machines and Control, 2020, 24(4): 32-39.
- [7] BERTOTTI G. General properties of power losses in soft ferromagnetic materials[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1988, 24(1): 621-630.
- [8] 揭丁爽, 黄苏融, 陈克慧, 等. 计及高次谐波影响的高密度永磁同步电机铁耗计算[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(4): 71-76.  
JIE Dingshuang, HUANG Surong, CHEN Kehui, et al. Calculation of iron loss of high density permanent magnet synchronous motor considering the influence of higher harmonics[J]. Electric Machines and Control Application, 2019, 46(4): 71-76.
- [9] JIAN Guozhu, RAMSDEN V S. Improved formulations for rotational core losses in rotating electrical machines[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1998, 34(4): 2234-2242.
- [10] 王朋, 邹海荣, 张舟云, 等. 电动汽车用永磁同步电机铁耗计算[J]. 微特电机, 2015, 43(7): 26-29.  
WANG Peng, ZOU Hairong, ZHANG Zhouyun, et al. Core loss calculations of pm machines for electric vehicles[J]. Small and Special Electrical Machines, 2015, 43(7): 26-29.
- [11] 刘蕾. 纯电动汽车水冷永磁同步电机多工况热特性及冷却系统研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2015.  
LIU Lei. The study of thermal characteristics in various conditions and cooling system of permanent magnet synchronous motor in pure electric vehicle[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2015.

## 作者简介

- 刘浩(1997—), 男, 工程师, 主要研究方向为特种车辆底盘传动系统设计。
- 吴学雷(1965—), 男, 研究员, 主要研究方向为特种车辆总体技术、动力传动技术。
- 李洪彪(1979—), 男, 研究员, 主要研究方向为特种电驱车辆技术。
- 白锦洋(1988—), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为特种车辆技术。
- 张冉(1991—), 男, 工程师, 主要研究方向为特种车辆底盘传动系统设计。