

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2312857

基于三维正交磁场的 AFPMMM 铁耗计算与分析*

曹永娟^{1,2} 张伟¹ 许焯枫¹ 顾迪¹(1.南京信息工程大学自动化学院 南京 210044; 2.南京信息工程大学江苏省大气环境与
装备技术协同创新中心 南京 210044)

摘要: 轴向磁场永磁记忆电机(AFPMMM)是一种新型结构的电机,铁耗的准确计算对电机性能分析有着重要意义。为了获得准确的 AFPMMM 铁耗,首先建立铁心多环分层模型并分析铁心典型位置处的磁场;其次,在经典损耗分离模型的基础上引入柱坐标系分解磁密以构建铁耗计算模型,该模型不仅考虑了高次谐波的影响,还通过磁滞损耗修正系数和涡流修正函数来提高铁耗计算精度;最后对样机进行实验测试,将改进后的模型和几种计算方法的结果值同时与实测值进行对比。研究结果表明:改进后铁耗模型在各转速下的计算精度得到明显的提升,相比实验结果平均偏差 3.45%,更加贴近实测值。

关键词: 轴向磁场永磁记忆电机;多环分层;涡流修正;三维正交铁耗模型

中图分类号: TM351 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4024

Calculation and analysis of AFPMMM iron loss based on
3D orthogonal magnetic fieldCao Yongjuan^{1,2} Zhang Wei¹ Xu Yefeng¹ Gu Di¹(1. School of Automation, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;
2. Jiangsu Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology (CICAET),
Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Axial field permanent magnet memory motor (AFPMMM) is a new type of motor. The accurate calculation of iron loss is of great significance to the performance analysis of the motor. In order to obtain accurate AFPMMM iron loss, firstly, the core multi ring delamination model is established and the magnetic field at the typical location of the core is analyzed. Secondly, based on the classical loss separation model, the column coordinate system is introduced to decompose the magnetic density to build the iron loss calculation model. This model not only considers the influence of higher harmonics, but also improves the iron loss calculation accuracy through the hysteresis loss correction coefficient and eddy current correction function. Finally, the prototype is tested, and the results of the improved model and several calculation methods are compared with the measured values. The research results show that the calculation accuracy of the improved iron loss model at each speed is significantly improved, with an average deviation of 3.45% compared to the experimental results, which is closer to the measured value.

Keywords: AFPMMM; multiloop delamination; eddy current correction; three dimensional orthogonal iron loss model

0 引言

轴向磁场永磁记忆电机(axial field permanent magnet memory motor, AFPMMM)具有气隙磁场灵活可调、轴向尺寸短、效率和功率密度高等优点,因此该电机在多种场合具有较好的应用场景。目前,轴向磁场永磁记忆电机的研究大多集中于控制、优化和拓扑结构的创新,但关于轴向磁

场电机的铁耗计算方面却研究甚少,准确计算电机各部分铁耗对进一步提升性能具有重要的意义^[1-2]。

为了解决铁耗计算误差较大的问题,Liu等^[3]提出的铁耗模型考虑了温度和应力等多物理场的作用,使预测结果更加接近实际,但实验验证需相应的物理测试设备。刘欢等^[4]针对宽频率且非正弦激励下变压器的铁耗改进了计算模型,从而获得较高计算精度。朱龙飞等^[5]利用多环等

收稿日期:2023-02-20

* 基金项目:国家自然科学基金(51507082)项目资助

效解析模型,直接推导气隙磁密、定子铁耗和永磁体涡流损耗的解析解,该算法虽然相比有限元法计算时间短,但只适用于对特定结构的电机建模和计算。刘光伟等^[6]对高速爪极电机采用三维正交交变磁化近似等效旋转磁化,该铁耗模型考虑了高次谐波的影响,但忽略了高频时的趋肤效应,应用于高转速电机时计算值偏大。Zhao 等^[7]提出一种参数随频率和磁密幅值变化的分段铁耗模型,但依赖于较多的拟合系数。田晶、江善林与董传友等学者^[8-10]根据铁心损耗正交等效理论提出椭圆法,该方法虽然考虑了旋转磁通的影响,但是一般用于传统径向电机中二维等效分析。Haddad 等^[11]将三维磁场解析和磁网络法相结合,但忽略了异常损耗项,相比实际值偏小。

针对上述问题,文章提出一种适用于轴向磁场永磁记忆电机铁耗计算的三维模型,该模型在经典 Bertotti 铁耗模型的基础上,利用柱坐标系将磁密分解并且计及多次谐波构建;针对局部磁滞回环和趋肤效应,引入磁滞回环系数和涡流矫正函数,同时依据不同频率变化考虑了对应的铁耗系数。文中所提模型的计算精度相比经验公式法、有限元法和磁密峰值法有较大提升,与实测结果吻合度较高,对轴向磁场电机铁耗计算具有较好的指导意义。

1 AFPMMM 基本结构及多环分层模型

1.1 基本结构

轴向电机拓扑结构主要分为以下几种:中间转子结构、单定子单转子结构、中间定子结构和多盘式结构^[1],文中研究的电机采用双定子单转子结构,如图 1 所示。磁极侧由 NdFeB35 和软磁材料拼接组合而成,6 块 AlNiCo 拼接在软磁材料下侧,且与上侧的 NdFeB35 共同构成 Halbach 结构,增大了气隙磁通,且获得相对正弦的气隙磁场,每块 AlNiCo 永磁体上都缠绕调磁绕组形成励磁侧;转子由 5 块扇形铁心齿组成,均匀周向排布在非导磁圆环上;三相集中绕组缠绕于下定子齿形成电枢侧^[12]。

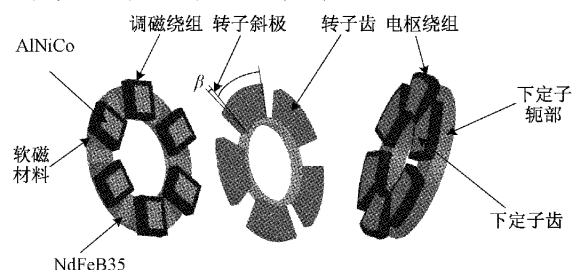


图 1 AFPMMM 基本模型

1.2 铁心多环分层模型

轴向磁场电机中三维磁路复杂,各个位置磁密分量的幅值有较大差异。为了精准分析电机各个部分铁耗分布情况,文中采用三维分层模型,如图 2(a)~(c)所示,忽略定转子边缘漏磁影响,将铁心按径向等分成内、中和外环。考虑到磁密在轴向上变化,将下定子等分为 1~7 层,取每个单

元的几何中心 ST1~ST6 和 SY1~SY15 作为典型位置,如图 2(a)所示;由于开槽导致气隙磁导不均匀,转子受到双边气隙中谐波磁场的影响,因此分为上下两层分析,取转子斜极典型位置为 RO1~RO4、主齿典型位置为 RU1~RU6、RD1~RD6,如图 2(b)所示;软磁部分厚度较薄,取典型位置为 SM1~SM3,如图 2(c)所示。该电机是单边不对称磁极结构,其基本参数如表 1 所示。

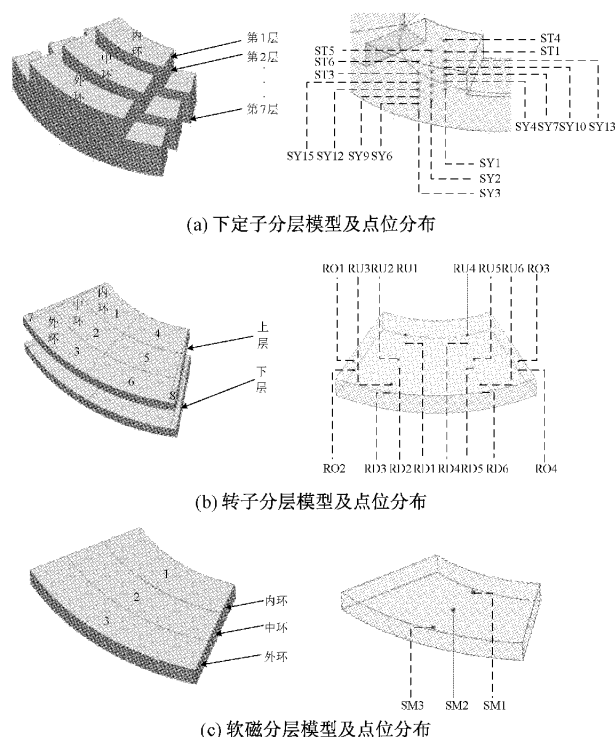


图 2 多环分层模型以及典型位置

表 1 AFPMMM 基本参数

参数	数值	参数	数值
额定功率 P_m/W	100	额定转速 $n/(r/min)$	1 000
永磁体外直径 R_o/mm	140	相数 m	3
永磁体内直径 R_i/mm	80	气隙长度 δ/mm	1
电机轴向长度 L_a/mm	50	AlNiCo 厚度 H_{al}/mm	10
电枢绕边宽 τ_{coil}/mm	15	NdFeB 极宽 $\theta_{nd}/(^{\circ})$	30
转子轴向长度 l_r/mm	8	电枢绕组匝数 N_a	100
转子极宽 $\theta_r/(^{\circ})$	52	励磁绕组匝数 N_m	40
定转子极数 p_s/p_r	6/5	电枢定子极宽 $\theta_s/(^{\circ})$	37

2 三维正交磁场分析

2.1 频率分析

铁耗与磁密频率、幅值呈现非线性关系,而 AFPMMM 不对称磁极结构使定转子磁密变化频率不相同,且变化频率不仅受转速的影响,还与磁场极性分布有关。转子极数不对称的电机,定转子铁心磁场变化的频率可分别表示如下^[10]:

$$f_s = \frac{n p_r}{60} \quad (1)$$

$$f_{rm} = \frac{p_s n}{60} \quad (2)$$

$$f_{rc} = \frac{p_s}{2} \cdot \frac{n}{60} \quad (3)$$

式中, f_s 是定子的频率, f_{rm} 、 f_{rc} 分别为转子合成磁密频率和分量磁密频率, Hz。

2.2 下定子不同位置磁密

AFPM 铁心磁场变化规律复杂, 各个典型位置同时受到轴向、切向和径向上合成磁场的作用, 磁密呈现非正弦、非线性变化趋势。选取图 2(a) 中 8 个典型位置进行磁密分解, 如图 3(a)~(h) 所示, B_z 为轴向磁密, B_r 为径向磁密, B_θ 为切向磁密。

图 3(a)~(c) 分别对应下定子轭部 5~7 层的代表点, 从图中可以看出, 切向磁密分量幅值最大, 径向磁密分量波动最小, 表明在轭部以旋转磁化为主; 图 3(d)~(e) 对应于下定子轭部 3~4 层的代表点, 随着代表点轴向位置的上升, 轴向分量逐渐超过切向分量, 在齿轭交界处受到两个分量的共同作用; 图 3(f)~(h) 对应下定定子齿部 1~2 层的代表点, 切向和轴向分量正弦度下降, 轴向分量逐渐变为平顶波, SY6 的切向磁密峰值达到 0.23 T, 轴向磁密峰值达到 0.18 T。

对下定子典型位置一个周期的磁密进行谐波分解, 以轭部 SY9、齿轭交界处 SY15 和定子齿部 ST6 的磁密 Z 分量为例, 其频率分解结果如图 4 所示。轭部和齿轭交界处的轴向磁密以基波和二次谐波为主, 三次及以上谐波含量较小。典型位置越靠近下定定子齿顶, 轴向磁密的基波幅值越大, 齿中的谐波分量以二到五次为主, 高次谐波含量明显增加。

2.3 转子齿不同位置磁密

对转子齿上的磁密进行分析, 图 5(a)~(h) 所示为 AFPM 转子上典型位置所对应磁密各分量的波形。转子齿主干部分上的磁密以切向分量为, RD3 的 θ 分量的磁密幅值达到 0.946 T, 但是在该层转子斜极部分 RO2 的 θ 分量磁密幅值仅有 0.151 T。根据磁阻最小原理, 当转子在磁路中的重叠面积减小时, 回路中的磁通从永磁体出发通过斜极区域的铁心进而穿过气隙到下定定子分流后形成闭合路径, 转子斜极区域磁通增大且主要受到交变轴向磁通的作用, 因此斜极 Z 分量占主要部分。

从图 5(a)~(d) 和 (e)~(h) 可看出, 转子齿上下层的磁密变化规律相似, 分量磁密变化周期为 20 ms。以 RU1~RU3 的 θ 分量为例作快速傅里叶变换 (fast fourier transform, FFT) 分析, 得到如图 6 所示结果。磁密 θ 分量主要以基波和奇次谐波为主, 从转子齿根到齿中最后到齿尖, 基波含量依次减小, 三次谐波的含量逐渐增加。因此, 越靠近转子齿尖, 磁密波形畸变越明显。

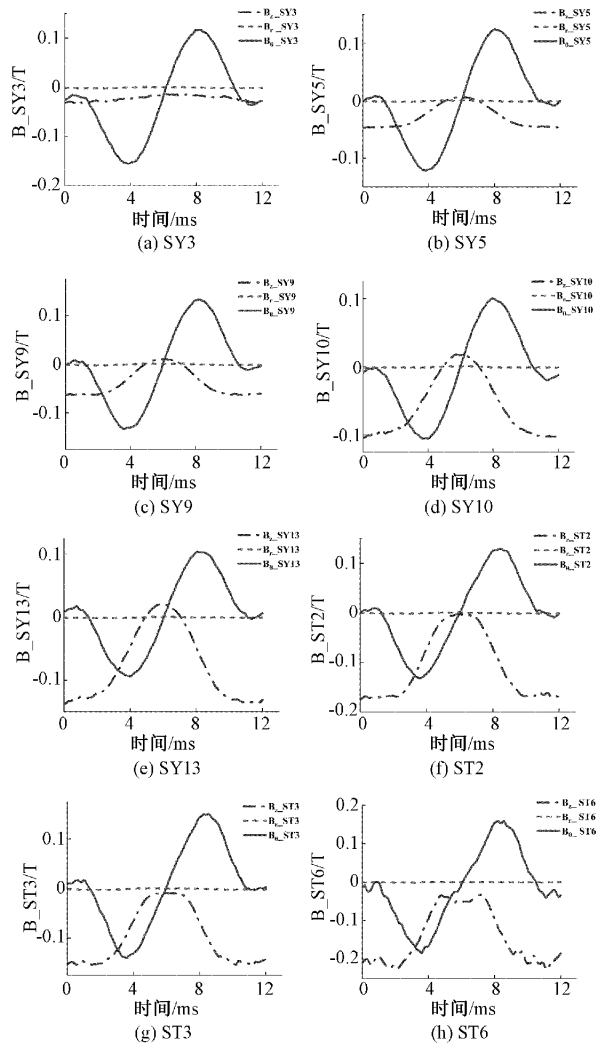


图 3 下定子磁密分量

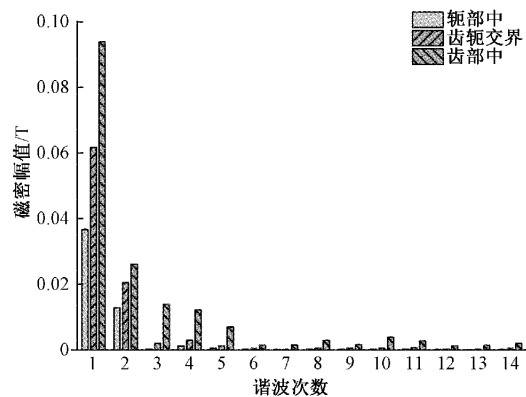


图 4 下定定子铁心磁密谐波分解

2.4 软磁侧不同位置磁密

对软磁侧区域典型位置的磁密分解, 如图 7(a)~(c) 所示, 由于 NdFe35 采用周向充磁, 故切向磁密分量 θ 占主要。磁通从两侧的 NdFe35 流入软磁, 接着沿着 -Z 轴方向流向 AlNiCo。因此, 轴向磁密在整个周期是负序磁密。

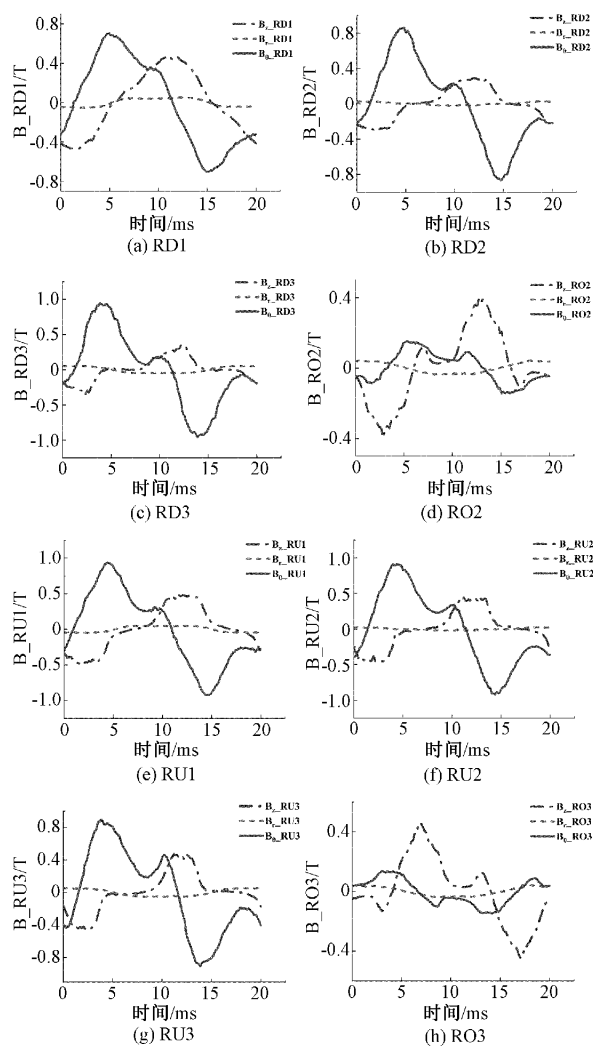


图 5 转子磁密分量

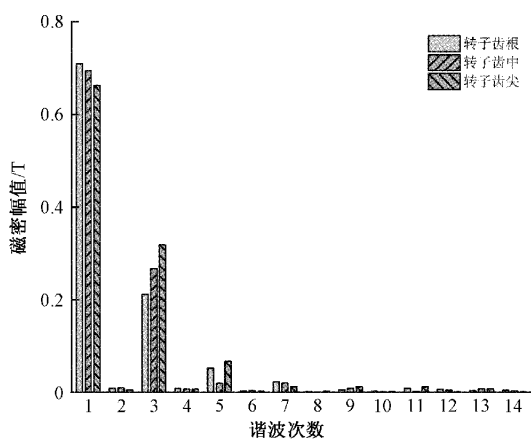


图 6 转子铁心主齿磁密谐波分解

3 AFPMMM 铁耗的三维计算模型

3.1 铁耗模型

电机的铁耗产生机理复杂,通常难以直接计算和测量。

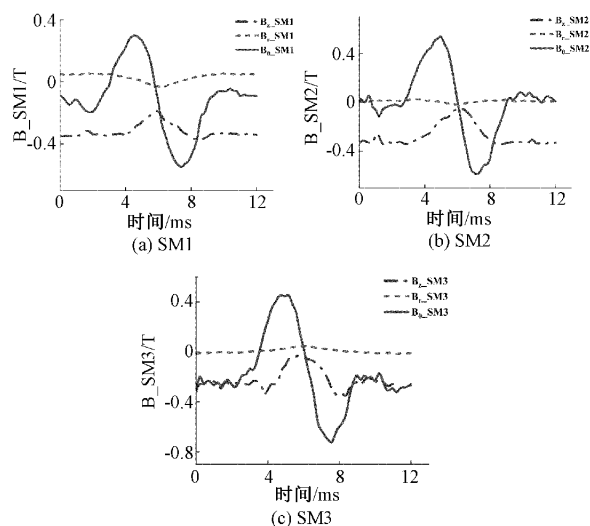


图 7 软磁磁密分量

铁耗主要分为磁滞损耗、涡流损耗和异常损耗。磁滞损耗是由铁心材料的磁滞特性产生;各方向的交变磁场在铁心中感生涡流,进而引起涡流损耗,其主要受交变频率、磁密影响;异常损耗主要是由于磁畴壁移动导致的涡流不均匀分布。

目前工程上计算的方法较粗糙,大多采用以下经验公式法计算^[1]:

$$P_{Fe} \approx P_{10/50} B^2 \left(\frac{f}{50}\right)^{1.3} \quad (4)$$

$$P_s = K_a P_{Fe} G_{Fe} \quad (5)$$

式中: P_{Fe} 为比铁耗,单位为 W/kg; $P_{10/50}$ 是钢的铁耗系数,其值可查表得到; B 为磁密,单位为 Tesla; f 为交变频率; P_s 为计算得到的铁耗总值; K_a 为经验系数; G_{Fe} 为钢的重量,单位为 kg。

Bertotti 于 1988 年提出铁耗三项分离计算模型,当磁密波形呈现一定畸变时,可利用下式计算^[13]:

$$P_{Fe} = P_h + P_c + P_a = K_{hc}(B_m) \cdot K_m(B) \cdot f_1 + \lambda_c \cdot \frac{1}{T_1} \cdot \int_0^{T_1} \left(\frac{dB}{dt}\right)^2 dt + \lambda_a \cdot \frac{1}{T_1} \cdot \int_0^{T_1} \left|\frac{dB}{dt}\right|^{1.5} dt \quad (6)$$

式中: P_h 为磁滞比损耗; P_c 为涡流比损耗; P_a 是巴克豪森跃变产生的损耗,一般称为异常比损耗; $K_{hc}(B_m)$ 表示为一个正弦波形周期内的能量损失; $K_m(B)$ 是磁滞回环修正系数; f_1 表示基波频率; T_1 为磁密波形周期; λ_c 和 λ_a 为采用磁密时域积分模型的涡流损耗系数和异常损耗系数。

根据式(6),当磁密波形为理想低频正弦波时,磁密峰值法的计算模型可表达为:

$$P_{Fe} = K_{hc}(B_m) \cdot f + K_c \cdot (B_m \cdot f)^2 + K_a \cdot (B_m \cdot f)^{1.5} = K_h f B_m^\alpha + K_c \cdot (B_m \cdot f)^2 + K_a \cdot (B_m \cdot f)^{1.5} \quad (7)$$

式中: K_h 、 K_c 、 K_a 为化简后的磁滞损耗系数、涡流损耗系数和异常损耗系数; α 为 Steinmetz 因子; B_m 为磁密幅值。

该正弦磁密波形的铁耗系数与畸变磁密波形的系数满足以下关系^[14]:

$$K_c = 2 \cdot \pi^2 \cdot \lambda_c \approx 19.74\lambda_c \quad (8)$$

$$K_a = \sqrt{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} |\cos(x)|^{1.5} dx \cdot \lambda_a \approx 8.763\lambda_a \quad (9)$$

径向电机的铁耗研究中,通常根据铁心中的磁化方式的不同,在二维平面中将电机的磁场分为径向交变磁场和周向旋转磁场,但该方法应用于轴向磁场电机时存在方法上的局限和计算精度上的偏离。

本文在此基础上提出用柱坐标系 (R, θ, Z) 将磁场分解成径向、切向和轴向分量进行分析。式(7)可表示为:

$$P_{Fe} = K_h f (B_{mr}^a + B_{m\theta}^a + B_{mz}^a) + K_c f^2 (B_{mr}^2 + B_{m\theta}^2 + B_{mz}^2) + K_a f^{1.5} (B_{mr}^{1.5} + B_{m\theta}^{1.5} + B_{mz}^{1.5}) \quad (10)$$

式中: B_{mr} 为径向磁密幅值; $B_{m\theta}$ 为切向磁密幅值; B_{mz} 为轴向磁密幅值。

考虑到谐波影响,故计及每个分量的高次谐波磁密幅值并将其叠加计算。因此,铁耗计算模型表示为:

$$\begin{cases} P_{Fe} = P_h + P_c + P_a \\ P_h = \sum_{i=1}^l K_h \cdot (if) \cdot (B_{zmi}^a + B_{rmi}^a + B_{\theta mi}^a) \\ P_c = \sum_{i=1}^l K_c \cdot (if)^2 \cdot (B_{zmi}^2 + B_{rmi}^2 + B_{\theta mi}^2) \\ P_a = \sum_{i=1}^l K_a \cdot (if)^{1.5} \cdot (B_{zmi}^{1.5} + B_{rmi}^{1.5} + B_{\theta mi}^{1.5}) \end{cases} \quad (11)$$

式中: i 为谐波次数, l 为计及的最高谐波次数。

进一步的,考虑到磁通波形受到高次谐波的影响会发生畸变,铁心的磁密波形会产生局部的小磁滞回环,磁滞损耗增大。因此,考虑磁滞损耗修正系数,对模型的磁滞损耗项进行修正:

$$K(B) = 1 + t_m \sum_{\xi=1}^S \left(\frac{\Delta B_{\xi}}{B_m} \right)^{\alpha_h} \quad (12)$$

式中: t_m 取常数 0.65; ΔB_{ξ} 是局部磁密的变化量; S 是一个周期磁滞回环个数; α_h 为磁滞损耗系数。铁心中交变频率 f 较低时,式(11)计算的误差较小,但是随着转速提升,磁场的交变频率越来越高,硅钢叠片中会发生明显的趋肤效应导致涡流分布不均匀,最后计算的涡流损耗项与实际值会有较大偏差。因此,本文利用随频率变化的涡流修正函数对该项修正:

$$K_c(f) = K_c \frac{3}{D\sqrt{f}} \frac{\sinh(D\sqrt{f}) - \sin(D\sqrt{f})}{\cosh(D\sqrt{f}) - \cos(D\sqrt{f})} \quad (13)$$

$$D = d \sqrt{\pi\mu\sigma_f} \quad (14)$$

式中: d 为硅钢片材料的厚度,单位为 m; μ 为平均磁导率,单位为 H/m; σ_f 为硅钢片的电导率,单位为 S/m。

最终得到三维正交变系数铁耗模型:

$$\begin{cases} P_{Fe} = P_h + P_c + P_a \\ P_h = \sum_{i=1}^l K_h K(B) \cdot (if) \cdot (B_{zmi}^a + B_{rmi}^a + B_{\theta mi}^a) \\ P_c = \sum_{i=1}^l K_c(f) \cdot (if)^2 \cdot (B_{zmi}^2 + B_{rmi}^2 + B_{\theta mi}^2) \\ P_a = \sum_{i=1}^l K_a \cdot (if)^{1.5} \cdot (B_{zmi}^{1.5} + B_{rmi}^{1.5} + B_{\theta mi}^{1.5}) \end{cases} \quad (15)$$

利用式(15),最终计算该轴向磁通电机的铁耗值为:

$$P_s = P_{Fe} \sum_{e=1}^{E_s} \rho \cdot \Delta V_e \quad (16)$$

式中: ρ 为所用硅钢材料的密度,单位为 Kg/m^3 ; ΔV_e 为各部分剖分单元的体积,单位为 m^3 ; e 为单元号; E_s 为剖分单元的个数。

3.2 基于粒子群算法铁耗系数的确定

铁耗计算模型中的系数值影响最后的计算精度。目前铁耗研究中大多采用最小二乘法或拟合工具获取铁耗系数。与传统方法相比,本文采用的自适应变异粒子群(Adaptive mutation particle swarm optimization, AMPSO)算法具有简单、精度高、收敛快等优点。

文中采用的铁心材料是 DW465-50,利用正弦供电下的 B-P 数据,在不同频率下对铁耗系数进行拟合。

在待辨识的 D 维搜索空间中,每个粒子代表空间中的一个候选解,设第 i 个粒子在整个解空间中的位置为 X_i ,速度表示为 V_i ,粒子搜索到的个体最优值为 P_i ,整个种群的目前最优解为 $\text{BestS}^{[15]}$ 。粒子的更新公式表示为:

$$V_i^{kg+1} = w(t) \times V_i^{kg} + c_1 r_1 (p_i^{kg} - X_i^{kg}) + c_2 r_2 (\text{BestS}_i^{kg} - X_i^{kg}) \quad (17)$$

$$X_i^{kg+1} = X_i^{kg} + V_i^{kg+1} \quad (18)$$

式中: $kg=1, 2, \dots, G$, kg 为当前进化代数, G 为最大进化代数; $i=1, 2, \dots, \text{Size}$, Size 为种群数量; $w(t)$ 为采用的时变惯性权重; r_1 和 r_2 为在 0 到 1 区间内的随机数; c_1 为局部学习因子; c_2 为全局学习因子。

利用式(7)定义适应度函数 $S(K_h, \alpha, K_c, K_a)$ 为:

$$S(K_h, \alpha, K_c, K_a) = \sum_{j=1}^n a (P_{vj} - \hat{P}_{vj})^2 = \sum_{j=1}^n a (P_{vj} - (K_h f B_{mj}^a + K_c (f B_{mj})^2 + K_a (f B_{mj})^{1.5}))^2 \quad (19)$$

式中: P_{vj} 为参考模型的输出,即损耗的实测值; \hat{P}_{vj} 为可调模型的输出; a 为适应度函数迭代的惯性系数。由两者之差得到粒子群的适应度,选择位置最优的粒子参与下一次速度更新,在 AMPSO 反复迭代下直到适应度函数无限趋于 0,此时全局最优粒子即铁耗模型的系数。最终得到不同频率下的铁耗系数,如表 2 所示。

3.3 模型计算结果对比分析

文章利用该改进后的模型对 AFPMMM 在空载条件下的铁耗进行计算,得到定转子各部分的铁耗,同时与经验

表 2 硅钢片 DW465-50 在不同频率下的损耗系数

频率/Hz	K_h	K_c	K_a	α
50	0.026 2	$1.060 6 \times 10^{-4}$	$1.645 7 \times 10^{-5}$	1.924 8
60	0.025 1	$1.101 6 \times 10^{-4}$	$1.472 3 \times 10^{-5}$	1.814 3
100	0.027 9	$1.056 8 \times 10^{-4}$	$1.568 5 \times 10^{-5}$	1.528 9
200	0.028 0	$1.304 5 \times 10^{-4}$	$1.210 9 \times 10^{-5}$	1.672 0
400	0.024 1	$1.201 8 \times 10^{-4}$	$0.752 2 \times 10^{-5}$	1.980 8
1 000	0.025 0	$1.039 0 \times 10^{-4}$	$0.453 8 \times 10^{-5}$	1.740 1

公式法、有限元法以及基于 Bertotti 分离模型改进的磁密峰值法的计算结果进行了比较,最终得到如表 3 和 4 所示的结果。谐波次数 l 取 30,在额定转速下,上下定子铁耗系数分别为 $K_h = 0.027$, $K_c = 1.052 \times 10^{-4}$, $K_a = 1.561 \times 10^{-5}$;转子上的频率为合成磁密对应的频率,其计算所设置的铁耗系数分别为 $K_h = 0.028$, $K_c = 1.057 \times 10^{-4}$, $K_a = 1.568 \times 10^{-5}$ 。

表 3 定转子各部分铁耗

各部分铁耗	下定子	转子	软磁	总计
磁滞损耗/W	0.179 9	0.612 0	0.066 1	0.858 0
涡流损耗/W	0.098 4	0.367 1	0.065 7	0.531 1
异常损耗/W	0.002 8	0.004 9	0.001 1	0.008 8
总计/W	0.281 0	0.984 0	0.133 0	1.398 0
比例/%	20.10	70.39	9.51	100.00

表 4 计算结果比对

计算方法	下定子/W	转子/W	软磁/W	总计/W
经验公式	0.187	0.696	0.093	0.976
有限元	0.260	0.832	0.123	1.215
磁密峰值法	0.241	0.821	0.127	1.188
三维正交铁耗模型	0.281	0.984	0.133	1.398

通过计算结果表 3 和 4 可以分析得到:

1) 由于电机运行在额定转速时,交变和旋转磁场的频率较低,铁心中感生的电流较小,因此涡流损耗值偏低,磁滞损耗占铁耗的主要部分;随着转速的升高,频率变大,而涡流损耗项又与频率的二次方呈正比,涡流损耗随之激增,但磁滞损耗和异常损耗项增长缓慢。

2) 异常损耗项仅占总铁耗的 0.629%,但在大功率的电机铁耗研究中不可忽略。

3) AFPMMM 中定转子铁心所受到的磁场强度和交变频率不同,因此铁耗值存在明显差异。由于电机在高速旋转时,转子区域受到两边气隙中谐波的影响较大且交变频率相对较高,因此改进后的模型计算的转子铁耗占比达到 70.39%,软磁侧的铁耗仅占 9.51%。

4) 磁密峰值法的结果值与有限元仍相差 -2.188%,由于考虑了高次谐波,以及对磁滞小回环和涡流集肤效应的系数修正,三维正交铁耗模型在计算精度上相较于有限元有 15.052% 的明显提升。

4 样机实验验证

为了进一步验证文中所提三维正交铁耗模型在 AFPMMM 铁耗计算上的精准性,对该电机进行空载下的铁耗测试。图 8(a)~(c) 为文章研究的轴向磁场永磁记忆电机的样机,图中分别给出了电枢绕组、铁心转子和 Halbach 阵列结构的定子盘。图 9 为测试台架。

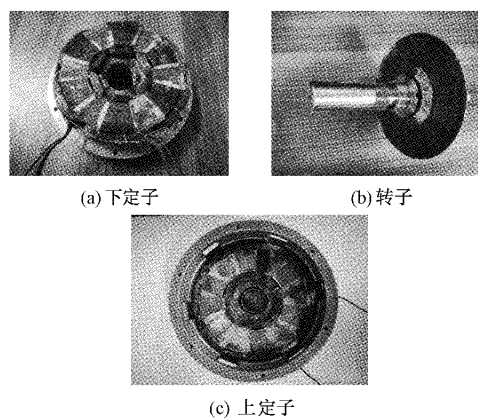


图 8 样机结构

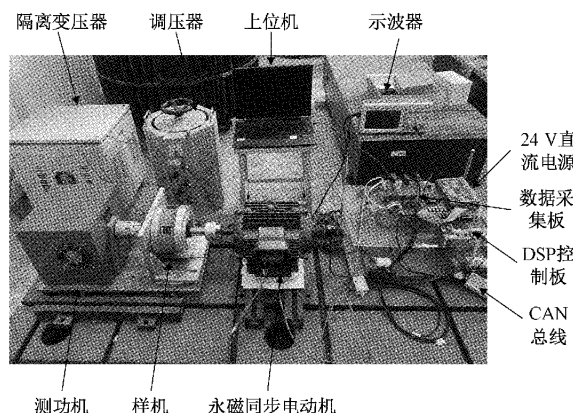


图 9 测试台架

空载时电机中的损耗主要包括铁耗和机械损耗,控制转速一致,利用原动机拖动无磁上定子的电机测得的输出功率作为机械损耗,拖动样机在多组转速下运行时测出的输出功率作为总损耗,最后将总损耗减去机械损耗值即为电机在空载状态下的铁耗值。

文中提出的各方法计算结果比较如图 10 所示,从图中看出改进三维铁耗模型的计算结果总体上最贴近实测值,相比实验结果平均偏差 3.45%,且在工程允许的误差范围之内。因此,采取该模型对轴向磁场电机的铁耗计算是合理的。

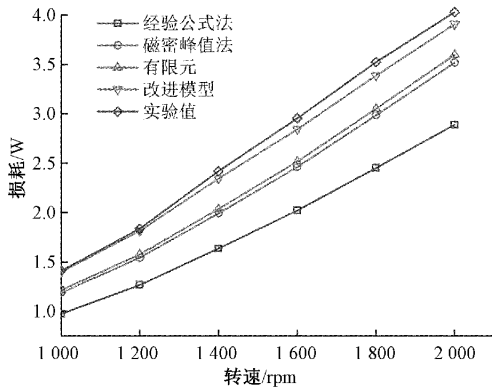


图 10 铁耗计算结果对比

5 结 论

文章对轴向磁场永磁记忆电机的铁耗计算模型进行了研究。依据其复杂的磁路建立了三维正交铁耗模型,在磁化方式上,该模型考虑了径向和轴向的交变以及切向的旋转磁化,对磁滞回环和趋肤效应进行系数矫正。通过建立铁心多环分层计算模型,精确分析不同部分铁心的交变频率,利用粒子群算法辨识不同频率下对应的铁耗系数以提高计算精度。

与传统的计算模型和方法相比,文中提出的三维正交磁场铁耗计算模型避免了复杂的积分运算,更加贴合实验测试结果,具有更为良好的精度。该方法为新型电机的铁耗计算提供了新的思路。

参考文献

- [1] 林明耀, 乐伟, 林克曼, 等. 轴向永磁电机热设计及其研究发展综述[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(6): 1914-1929.
- [2] 冯志伟, 毛国勇, 余世刚, 等. 基于新型趋近律的PMSM反演滑模控制[J]. 电子测量技术, 2022, 45(20): 68-73.
- [3] LIU G W, LIU M Y, ZHANG Y, et al. High-speed permanent magnet synchronous motor iron loss calculation method considering multiphysics factors [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 67(7): 5360-5368.
- [4] 刘欢, 李永建, 张长庚, 等. 非正弦激励下纳米晶材料高频磁心损耗的计算方法改进与验证[J]. 电工技术学报, 2023, 38(5): 1217-1227.
- [5] 朱龙飞, 朱建国, 佟文明, 等. 轴向磁通非晶合金永磁电机空载铁耗的解析计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(3): 923-931.
- [6] 刘光伟, 赵新刚, 张凤阁, 等. 高速永磁爪极电机铁耗与空气摩擦损耗计算[J]. 电工技术学报, 2015, 30(2): 148-154.
- [7] ZHAO H S, ZHANG D D, WANG Y L, et al. Piecewise variable parameter loss model of laminated steel and its application in fine analysis of iron loss of inverter-fed induction motors[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 54(1): 832-840.
- [8] 田晶, 朱学忠, 周翔. 开关磁阻电机的铁损分析与计算[J]. 机电工程, 2015, 32(2): 256-260.
- [9] 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.
- [10] 董传友, 李勇, 丁树业, 等. 开关磁阻电机铁心损耗分析[J]. 电机与控制学报, 2015, 19(7): 58-65.
- [11] HADDAD R Z. Iron loss analysis in axial flux permanent magnet synchronous motors with soft magnetic composite core material [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 37(1): 295-303.
- [12] 曹永娟, 冯亮亮. 基于响应面法的轴向磁场永磁记忆电机多目标优化设计[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2021, 13(5): 620-627.
- [13] CHEN J Q, WANG D, CHENG S W, et al. Influence of DC-biased magnetic induction on magnetic property of silicon steel[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2019, 55(5): 1-7.
- [14] 张新生, 王瑞田, 肖飞, 等. CPS-SPWM级联H桥激励的变压器铁耗快速计算方法[J/OL]. 西南交通大学学报: 1-9[2023-05-03]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1277.U.20220520.1400.002.html>.
- [15] 孙世政, 向洋, 党晓圆, 等. 基于粒子群解耦算法的FBG流量温度复合传感研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(1): 2-10.

作者简介

曹永娟,工学博士,副教授,主要从事新型永磁电机优化设计及控制方面的研究工作。

E-mail: yjcao@nuist.edu.cn

张伟,硕士研究生,主要从事永磁电机损耗计算研究。

E-mail: weizhang0227@126.com