

SMC 定子轴向磁通永磁电机电感参数研究

刘宇豪, 黄平林*, 陈先峰

(江苏大学 机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

Study of Inductance Parameter of an Axial Flux Permanent Magnet Machine with SMC Stator

LIU Yuhao, HUANG Pinglin*, CHEN Xianfeng

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: [Objective] To address the demands of low-altitude heavy-duty unmanned aerial vehicle propulsion systems for high power density and robust anti-saturation capability, this study designs an axial flux permanent magnet machine (AFPMM) with a soft magnetic composite (SMC) stator core. The research aims to reveal the influence of stator material properties on machine inductance characteristics and provide theoretical support for enhancing the electromagnetic performance of AFPMM. [Methods] Firstly, a three-dimensional electromagnetic field model of AFPMM was established based on the finite element method. Then, the magnetic circuit characteristics of stators made of SMC, grain-oriented (GO) silicon steel, and non-oriented (NO) silicon steel were comparatively analyzed. Finally, the nonlinear variation rules of dq -axis inductances with current angle and current amplitude were quantified, and the saturation mechanisms of machine inductance under different stator materials were systematically investigated through magnetic flux density distribution analysis. [Results] The results showed that the machine with SMC stator has isotropic properties and optimal anti-saturation capability. The machine with GO silicon steel stator has anisotropic characteristics with the highest initial inductance as well as output torque, but the inductance drop was significant at high currents. The inductance characteristics of machine with NO silicon steel stator was between SMC stator and GO silicon steel stator. [Conclusion] Although the machine with GO steel stator offers higher torque density, its performance necessitates optimized magnetic circuit design to suppress cross-saturation effects. The machine with SMC stator can effectively balance the dq -axis inductance and alleviate local saturation, which is suitable for high-frequency and complex magnetic circuit working scenarios. This study verifies the advantages of SMC stator in meeting the practical demands of unmanned aerial

vehicles and provides theoretical guidance for material selection and electromagnetic design in high-performance motor.

Key words: axial flux permanent magnet machine; soft magnetic composite; grain-oriented silicon steel; non-oriented silicon steel; inductance

摘要:【目的】为满足低空重载无人机驱动系统对高功率密度、强抗饱和能力的需求,本文设计了一种以软磁复合材料(SMC)为定子铁心的轴向磁通永磁电机(AFPMM),旨在揭示定子材料特性对电机电感特性的影响规律,为提升 AFPMM 电磁性能提供理论支撑。【方法】首先,基于有限元法建立了 AFPMM 的三维电磁场模型;然后,对比分析了 SMC 定子、取向(GO)硅钢定子及无取向(NO)硅钢定子的磁路特性;最后,量化了 dq 轴电感随电流角度、电流幅值的非线性变化规律,并通过磁通密度分布分析系统地研究了不同定子材料下电机电感的饱和机制。【结果】结果表明,SMC 定子电机具有各向同性特性,抗饱和能力最优;GO 硅钢定子电机具有各向异性特性,初始电感以及输出转矩最高,但高电流时电感降幅显著;NO 硅钢定子电机电感特性介于 SMC 定子电机和 GO 硅钢定子电机之间。【结论】虽然 GO 硅钢定子电机的转矩密度更高,但是需优化磁路设计,以抑制交叉饱和效应。SMC 定子电机能有效平衡 dq 轴电感,缓解局部饱和,适用于高频、复杂磁路的工作场景。本研究体现了 SMC 定子满足无人机实际需求方面的优势,为高性能电机的材料选择和电磁设计提供了理论指导。

关键词: 轴向磁通永磁电机;软磁复合材料;取向硅钢;无取向硅钢;电感

0 引言

永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)具有高转矩、高功率密

度以及宽调速范围等特点,在航空航天^[1]、新能源汽车^[2]以及社会工业应用^[3]等领域备受关注。本文聚焦于电动航空领域中的驱动电机,其主要需求包括高功率密度、高效率以及高可靠性^[4-6]。轴向磁通永磁电机(Axial Flux Permanent Magnet Machine, AFPMM)独特的轴向紧凑构型与高效电磁转换特性,恰好契合航空推进系统对驱动单元轻量化与性能优化的双重诉求,在电动汽车、无人机、电梯曳引机和工业设备等多领域展现出显著的工程应用潜力,持续吸引国内外学术界关注^[7]。尽管由于精密制造工艺及成本问题,产业化进程面临挑战,但是在首要考虑电机性能的航空领域,AFPMM 仍是有利的选择^[8-10]。文献[11]设计了一种面向航天器推力矢量控制(Thrust Vector Control, TVC)系统的高功率密度驱动电机设计方案,采用 Halbach 永磁阵列拓扑,该结构在优化转子磁场分布的同时,有效减小了转子尺寸,提升了功率密度,使其更适应航天器 TVC 驱动系统的高速运行需求。文献[12]设计了面向航空器辅助动力单元的 20 kW/3 000 rpm 新型永磁电机架构,其核心创新在于采用 10JNEX900 新型软磁复合材料(Soft Magnetic Composite, SMC)构建定转子系统,使铁损降低至传统硅钢的 20%,配合轴向分布式风冷拓扑,实现全工况效率提升的同时满足持续功率输出要求。文献[13]针对电动航空领域的特殊需求,通过构建多层无铁心轴向磁通拓扑,成功将输出功率提升至 53.8 kW,突破性地采用介质油循环冷却技术,使定子电负荷能力达到常规设计的 3.2 倍,在 96% 系统效率基础上,进一步提升了转矩密度,为电推进系统轻量化提供了新路径。文献[14]聚焦超轻型飞行器螺旋桨驱动场景,通过电磁-结构协同设计方法优化 15 槽 12 极电机模型,应用 Halbach 阵列磁极构型,在确保气隙磁通谐波畸变率低于 5% 且避免永磁体退磁的前提下,实现转子磁轭厚度缩减 43%,整机功率密度达到 1.36 kW/kg,为高动态飞行工况提供了可靠动力解决方案。

值得注意的是,上述电机性能的突破不仅依赖于结构创新,更与新型定子材料的应用密切相关。特别是在电动航空领域中,电机在无人机起步爬升、高空维稳以及迅速变向等高频高负载工况下会面临磁路饱和、损耗激增等问题,此时定子

铁心材料的选择会直接影响其性能表现。SMC 是一种由铁磁粉末(如铁硅合金)与绝缘粘合剂经粉末冶金工艺压制而成的先进软磁材料^[15],其在高频电磁场中表现出低涡流损耗、高电阻率及优异的抗饱和能力^[16]。相较于传统硅钢片,SMC 可灵活成型为复杂三维磁路,显著降低高频工况下的铁心损耗^[17],同时缓解磁路局部饱和问题,尤其适用于轴向磁通电机、高频变压器等对磁场分布均匀性和动态响应要求严苛的场景^[18]。由于此类电机运行特性、弱磁控制都与 dq 轴电感直接相关,研究电机的电感参数,有助于高效地完成电机控制和本体的设计与优化。随着电磁分析软件功能的不断提升,快速准确地计算出轴向磁通电机电感参数成为现实。

本文提出一种基于 SMC 的 AFPMM 设计方案,基于 SMC 三维各向同性与饱和速率低的特性,构建双转子单定子拓扑,实现磁路多向分流以抑制饱和;通过 Ansys Maxwell 建立三维非线性电磁场模型,量化分析 dq 轴电感随电流角度($0^\circ \sim 90^\circ$)以及幅值($0 \sim 200$ A)的非线性变化规律,并将定子材料替换为取向(Grain-Oriented, GO)硅钢与无取向(No-Oriented, NO)硅钢进行对比试验,系统验证 SMC 定子电感一致性与抗饱和性能方面的优势。

1 AFPMM 的数学模型及坐标变换

由于 AFPMM 与径向 PMSM 的工作原理相同,其数学模型具有相似性,可以根据径向 PMSM 的分析方法来得到 AFPMM 的数学模型。AFPMM 是一个多变量、非线性系统,为了便于分析,以下计算分析均建立在理想条件下^[19]。

AFPMM 的电感参数与转子位置角相关,为简化数学模型,对转子位置角进行解耦。与径向 PMSM 类似,在同步旋转 dq 坐标系中将转子磁极产生的磁场 N 极的中心线作为 d 轴,而超前 d 轴 90° 电角度的位置为 q 轴。图 1 为 AFPMM 定子三相静止 ABC 坐标系、定子两相静止 DQ 坐标系和转子同步旋转 dq 坐标系三者关系图。

根据三坐标系的关系,对三相静止 ABC 坐标系的模型进行 Clarke 变换和 Park 变换可得到 AFPMM 在转子同步旋转 dq 坐标系下的定子电压方程和磁链方程:

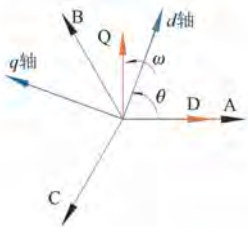


图 1 AFPMM 各坐标系关系图

Fig. 1 Diagram of the relationship between the coordinate systems of AFPMM

$$\begin{cases} u_d = R_a i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega \psi_q \\ u_q = R_a i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega \psi_d \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_d 、 u_q 分别为 d 、 q 轴等效电压; R_a 为每相绕组的相电阻; ω 为转子同步旋转电角速度; ψ_d 、 ψ_q 分别为 d 、 q 轴等效磁链, 其表达式为

$$\begin{cases} \psi_d = \psi_f + L_d i_d \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (2)$$

式中: i_d 、 i_q 分别为 d 、 q 轴等效电流; L_d 、 L_q 分别为 d 、 q 轴等效电感; ψ_f 为永磁体磁链。

由式(1)和式(2)得到 AFPMM 在 dq 坐标系下的等效电压方程为

$$\begin{cases} u_d = R_a i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega L_q i_q \\ u_q = R_a i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega (L_d i_d + \psi_f) \end{cases} \quad (3)$$

最后通过计算得到电机 d 、 q 轴等效电流与定子三相电流的关系为

$$\begin{cases} i_d = \sqrt{3} I_1 \sin(\theta_1 - \theta_0) \\ i_q = -\sqrt{3} I_1 \cos(\theta_1 - \theta_0) \end{cases} \quad (4)$$

式中: I_1 为定子电流有效值; θ_1 为三相激励电流初始电角度; θ_0 为 dq 坐标系的初始电角度。

由式(4)可以得出, 控制角度 $\theta_0 = 0$, 也就是将 d 轴与电流激励的 A 相轴线对齐, 通过改变 θ_1 的大小可以得到不同情况下有限元分析中 d 、 q 轴电流的大小, 进而分析 d 、 q 轴电流对 d 、 q 轴电感的影响。

当给三相静止 ABC 绕组通激励电流时, 根据其磁链表达式和三相静止 ABC 坐标系下的磁链与同步旋转 dq 坐标系之间的相互转换关系, 可得到 AFPMM 的三相电感与 d 、 q 轴电感之间的转换表达式为^[20-21]

$$L_{dq} = C^T L_{UVW} C \quad (5)$$

$$C = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: L_{UVW} 为三相电感矩阵。

电机 d 、 q 轴电感受到磁路结构以及铁心材料的影响, 其表达式为

$$L_{dq} = \frac{N^2 \mu_0 \mu_r A_{dq}}{l_{dq}} \quad (7)$$

式中: N 为线圈匝数; μ_0 为真空磁导率; μ_r 为铁心材料的相对磁导率, 与磁密呈非线性关系(饱和效应); A_{dq} 为 dq 轴等效磁路截面积; l_{dq} 为 dq 轴等效磁路长度。

当磁密增加, 铁心材料逐渐进入饱和区, μ_r 下降, 电感随之降低, 电感随磁密 B 变化的简化模型为

$$L_{dq}(B_{dq}) = \frac{L_{dq}}{1 + k_{sat} B_{dq}^2} \quad (8)$$

式中: k_{sat} 为饱和系数, 可由铁心材料的磁化曲线拟合得到。

2 AFPMM 样机设计

本文所设计的电机结构参数如表 1 所示。AFPMM 模型如图 2 所示, 电机为双转子单定子结构, 该结构功率密度更高^[22], 可以更好地满足需求。

表 1 电机结构参数

Tab. 1 Structural parameters of the motor

参数名称	参数值
极数	20
槽数	18
定子内径/mm	219
定子外径/mm	116
定子高度/mm	45
转子高度/mm	14
绕组连接方式	星形连接
气隙长度/mm	1

AFPMM 的气隙磁密波形和磁密云图如图 3 和图 4 所示。

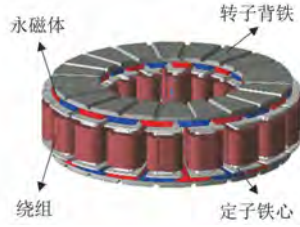


图2 AFPMM 模型

Fig. 2 AFPMM model

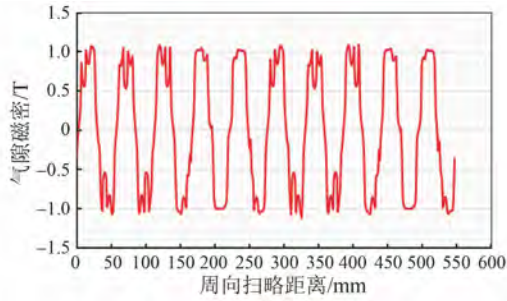


图3 AFPMM 气隙磁密波形

Fig. 3 Air gap magnetic flux density waveform of AFPMM

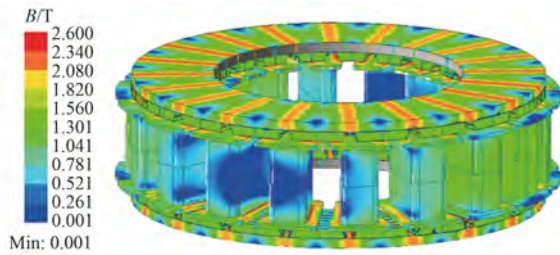


图4 AFPMM 磁密云图

Fig. 4 Contour map of magnetic flux density of AFPMM

Somaloy SMC-P700 由铁粉颗粒与绝缘材料混合压制而成,其磁特性在三维方向均匀^[23],厂商提供的材料磁性能数据如表 2 所示。

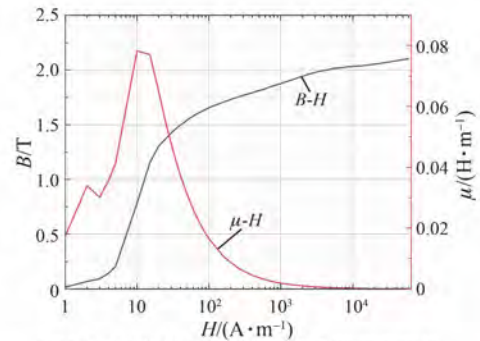
根据已有参数,在 Ansys Maxwell 电磁分析软件中完成各部件材料的赋予、运动的设置以及网格的划分等步骤,然后进行仿真运算。

作为对比,采用 30Q130 和 20JNEN1500 硅钢片分别替换定子铁心材料。30Q130 具有各向异性,因此该材料在各个方向上的磁性能不同,30Q130 沿轴向和圆周方向的磁化曲线和磁导率曲线如图 5(a)和图 5(b)所示;20JNEN1500 具有各向同性,因此该材料在各个方向上的磁性能一致,20JNEN1500 的磁化曲线和磁导率曲线如图 5(c)所示。

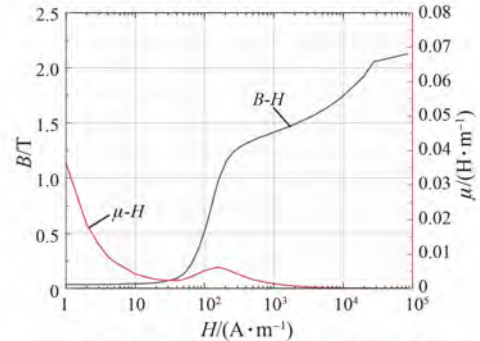
表2 SMC 磁性能数据

Tab. 2 SMC magnetic performance data

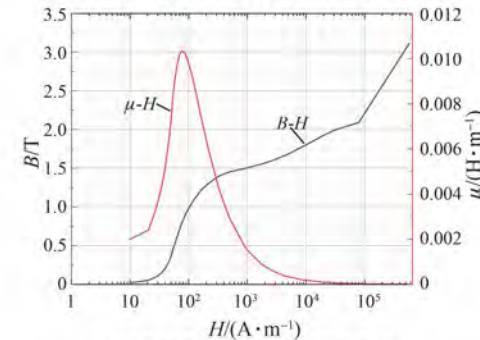
磁场强度 $H/(A \cdot m^{-1})$	磁密 B/T	磁场强度 $H/(A \cdot m^{-1})$	磁密 B/T
0	0.00	12 904	1.49
93	0.03	26 799	1.68
165	0.06	49 770	1.83
284	0.12	74 770	1.92
399	0.19	99 770	1.98
457	0.23	124 770	2.03
1 104	0.58	149 770	2.08
1 594	0.77	189 770	2.15
2 306	0.95	229 770	2.21
3 606	1.13	279 770	2.29
6 468	1.31	304 770	2.33



(a) GO硅钢沿轴向方向的磁化和磁导率曲线



(b) GO硅钢沿圆周方向的磁化和磁导率曲线



(c) NO硅钢的磁化和磁导率曲线

图5 两种硅钢的磁化和磁导率曲线

Fig. 5 Magnetization and permeability curves of two silicon steels

3 电感计算分析

首先在软件的 3D Design Setting 中启用电感计算并设置电感计算类型为 Apparent, 即视在电感。由式(4)可知, 通过控制 $\theta_0 = 0$, 改变 θ_1 的大小可实现只加载 d 轴电流 ($i_d > 0, i_q = 0$)、只加载 q 轴电流 ($i_d = 0, i_q > 0$) 和同时加载 d, q 轴电流 ($i_d > 0, i_q > 0$) 三种情况。通过分析三种情况下定子铁心材料采用 GO 硅钢、NO 硅钢和 SMC 对电机 d, q 轴电感的影响。

3.1 只加载 d 轴电流

通过控制 $\theta_1 = 90^\circ$ 来实现 $i_d > 0, i_q = 0$ 的工况。 i_d 对 L_d, L_q 的影响如图 6 所示。

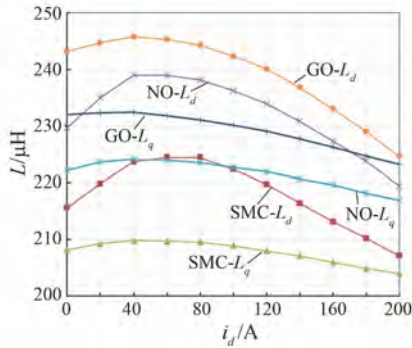


图 6 L_d, L_q 随 i_d 的变化曲线

Fig. 6 Variation curves of L_d and L_q versus i_d

由图 6 可知, L_d 经历了非单调变化。在初始上升阶段, SMC 定子电机的 L_d 从 215.59 μH 升至 224.41 μH , 增幅 4.1%; NO 硅钢定子电机的 L_d 从 229.68 μH 升至 238.08 μH , 增幅 3.7%; GO 硅钢定子电机的 L_d 从 243.11 μH 升至 245.73 μH , 增幅 1.1%。在后续下降阶段, SMC 定子电机的 L_d 从 224.41 μH 降至 207.13 μH , 降幅 7.7%; NO 硅钢定子电机的 L_d 从 238.08 μH 降至 219.43 μH , 降幅 7.8%; GO 硅钢定子电机的 L_d 从 245.73 μH 降至 224.64 μH , 降幅 8.6%。出现这种情况的原因是: i_d 较小时, d 轴磁路未饱和, 电流激励强化磁场, 磁导率短暂提升; 而后 i_d 升高导致 d 轴磁路饱和, 磁导率下降, 电感值跌落。

L_q 的情况有所不同, L_q 随电流增大均先以小于 1% 的增幅短暂增加再下降。SMC 定子电机的 L_q 从 209.75 μH 降至 203.99 μH , 降幅 2.7%; NO 硅钢定子电机的 L_q 从 224.15 μH 降至 216.86 μH , 降幅 3.2%; GO 硅钢定子电机的 L_q 从 232.96 μH 降

至 223.16 μH , 降幅 4.2%。出现这种现象的原因是 i_d 通过交叉饱和效应影响 q 轴磁路, 导致 L_q 随 i_d 升高而降低。

综合来看, 在只加载 i_d 的情况下, i_d 对 L_d 的影响较大, 对 L_q 的影响较小。GO 硅钢的取向性在 d, q 轴方向磁导率最高, 但受交叉饱和影响更显著; SMC 因各向同性磁阻较高^[24], 但对于耦合效应有所抑制, 且磁粉间气隙可以延缓饱和。

3.2 只加载 q 轴电流

通过控制 $\theta_1 = 0$ 来实现 $i_q > 0, i_d = 0$ 的工况。 i_q 对 L_d, L_q 的影响如图 7 所示。

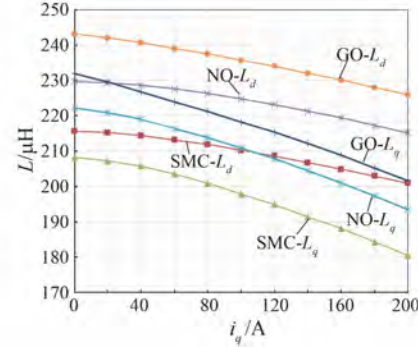


图 7 L_d, L_q 随 i_q 的变化曲线

Fig. 7 Variation curves of L_d and L_q versus i_q

由图 7 可知, 只加载 q 轴电流时, 随着 i_q 的增大, L_d 与 L_q 均单调下降。 L_d 的降幅较小, SMC 定子电机的 L_d 从 215.59 μH 降至 200.91 μH , 降幅 6.8%; NO 硅钢定子电机的 L_d 从 229.68 μH 降至 215.17 μH , 降幅 6.3%; GO 硅钢定子电机的 L_d 从 243.11 μH 降至 225.89 μH , 降幅 7.1%。 L_q 的降幅较大, SMC 定子电机的 L_q 从 208.15 μH 降至 180.55 μH , 降幅 13.3%; NO 硅钢定子电机的 L_q 从 222.15 μH 降至 193.50 μH , 降幅 12.9%; GO 硅钢定子电机的 L_q 从 231.96 μH 降至 201.63 μH , 降幅 13.1%。出现这种现象的主要原因是: i_q 产生的 q 轴磁场通过定子铁心横向路径耦合至 d 轴, 导致 L_d 小幅下降; 而 q 轴磁路直接受 i_q 激励, 磁密快速达到饱和, L_q 大幅下降。

综合来看, 在只加载 i_q 的情况下, i_q 对 GO 硅钢定子电机的 L_d 和 L_q 影响更大, 即 GO 硅钢定子电机的 L_d 和 L_q 对 i_q 更为敏感。

3.3 同时加载 d, q 轴电流

通过控制 $0 \leq \theta_1 \leq 90^\circ$ 来实现 $i_d > 0, i_q > 0$ 的工况。三种材料定子电机的 L_d 随电流变化的关系

曲线如图 8 所示。

由图 8 可知,在 $\theta_1 = 0$ 时,三种定子电机的 L_d 随电流增大单调下降,因 q 轴磁场通过交叉饱和

应影响 d 轴磁路。随着 θ_1 增大, i_d 分量增加, L_d 呈现先升后降趋势,体现磁硬化与饱和效应的竞争关系。

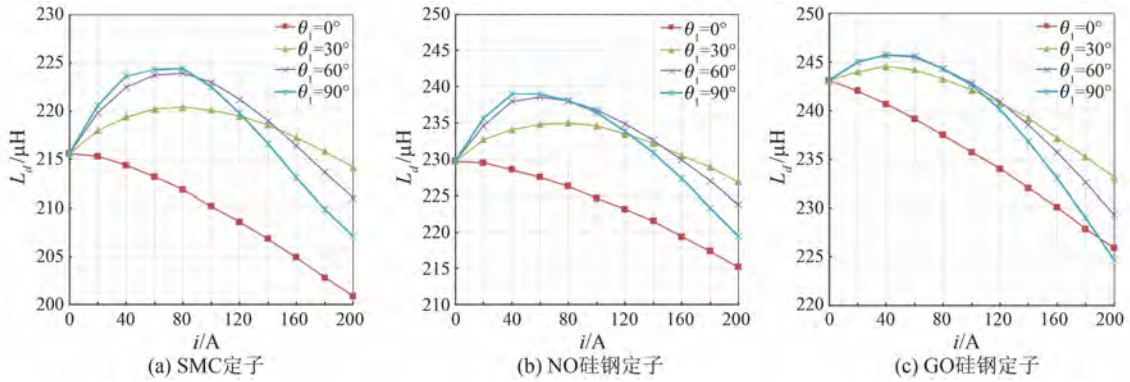


图 8 L_d 随 i_d 、 i_q 的变化曲线

Fig. 8 Variation curves of L_d versus i_d and i_q

对于 SMC 定子电机, $\theta_1 = 0$ 时,因 q 轴磁场交叉饱和抑制 d 轴磁导率, L_d 从 215.59 μH 降至 200.91 μH ,降幅 6.8%。当 θ_1 在 $30^\circ \sim 90^\circ$ 区间内,低电流区 ($0 \sim 80$ A) i_d 分量触发磁硬化效应, L_d 上升, $\theta_1 = 90^\circ$ 时 L_d 峰值最高,为 224.41 μH ;高电流区 (>80 A) 饱和效应主导, L_d 下降,但降幅小于硅钢材料, $\theta_1 = 30^\circ$ 时因 i_q 分量分散磁密, L_d 仍保持较高值。

对于 NO 硅钢定子电机, $\theta_1 = 0$ 时 L_d 从 229.68 μH 降至 215.17 μH ,降幅 6.3%。当 θ_1 在 $30^\circ \sim 90^\circ$ 区间内,低电流区 i_d 分量提升磁导率, L_d

显著上升;高电流区因饱和效应导致 L_d 下降,由于磁路均匀性抑制局部饱和,降幅平缓。 $\theta_1 = 60^\circ$ 时 L_d 保持较高值,为 237.98 μH 。

对于 GO 硅钢定子电机, $\theta_1 = 0$ 时 L_d 从 243.11 μH 降至 225.89 μH ,降幅 7.1%,高初始磁导率加剧交叉饱和^[5]。当 θ_1 在 $30^\circ \sim 90^\circ$ 区间内,低电流区 i_d 分量提升磁导率, L_d 显著上升;高电流区饱和效应剧烈, L_d 降幅最大。在 $\theta_1 = 60^\circ$ 时因 i_d 占比与磁导率优势叠加,此时 L_d 峰值最高,为 244.54 μH 。

三种材料定子电机的 L_q 随电流变化的关系曲线如图 9 所示。

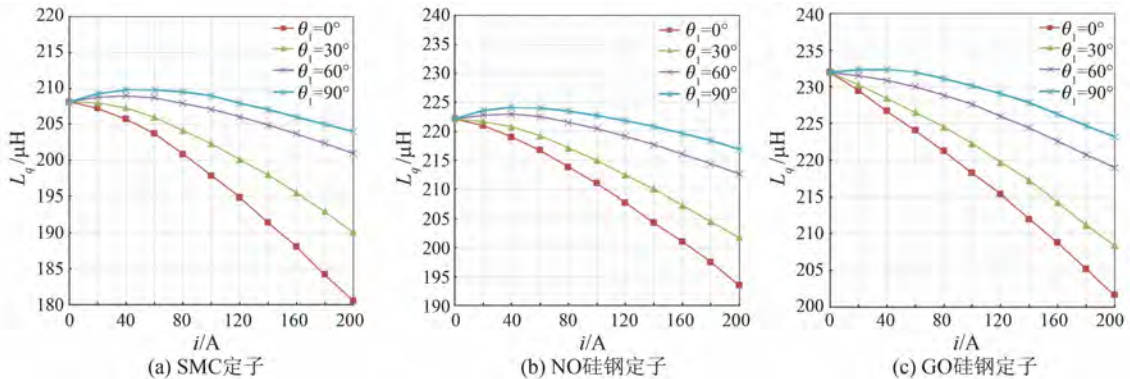


图 9 L_q 随 i_d 、 i_q 的变化曲线

Fig. 9 Variation curves of L_q versus i_d and i_q

由图 9 可知,在 $\theta_1 = 0$ 时,因 q 轴自饱和效应,三种定子电机的 L_q 随电流增大单调下降。对于 SMC 定子电机,当 θ_1 在 $60^\circ \sim 90^\circ$ 区间内,低电流区 i_d 轻微改善 q 轴磁路, L_q 上升;高电流区 d 轴

饱和效应抵消磁硬化效应, L_q 下降。NO 硅钢定子电机的磁畴无序性使磁硬化效应分散, L_q 上升幅度有限,在饱和后磁导率均匀下降, L_q 降幅适中;GO 硅钢定子电机仅在 $\theta_1 = 90^\circ$ 时呈现先升后

降,体现其高取向性对磁路的特殊影响^[25]。

从 L_d 、 L_q 整体变化可以看出,GO 硅钢定子电机有最高初始电感,弱磁能力强,但饱和最快。尤其在加载 i_d 时,各向异性显著, q 轴磁阻高,交叉饱和敏感。NO 硅钢定子电机的电感值适中,磁路均匀性抑制局部饱和,交叉耦合效应较弱,抗饱

和能力平衡,适合宽电流范围应用。SMC 定子电机的各向同性最佳,抗饱和能力强,高频损耗低,但初始电感最低,适合高频、高动态以及磁通路径复杂的场景,如无人机电机^[26]。

同时加载 i_d 、 i_q 时,三种定子电机的平均转矩随电流的变化曲线如图 10 所示。

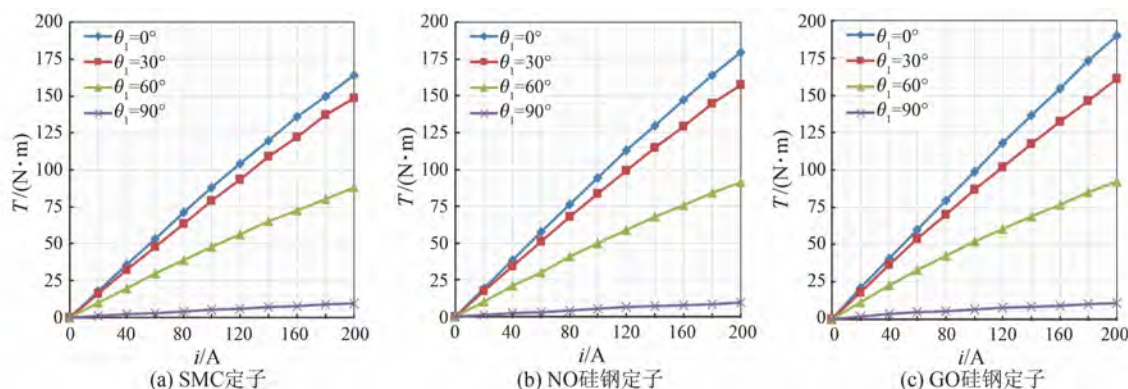


图 10 转矩随电流的变化关系曲线

Fig. 10 Variation curves of torque versus current

由图 10 可知,转矩随 θ_i 增大而降低,随电流增大近似线性增长,但高电流时饱和效应显著。GO 硅钢定子电机的转矩系数是三者中最大的。

4 结语

(1) 本文通过有限元仿真验证了同时加载 d 、 q 轴电流工况下,电感参数的非线性变化规律。研究表明,交叉饱和效应导致纯 q 轴电流激励时 d 轴电感降幅达 6.8% (SMC) 至 7.1% (GO 硅钢),而纯 d 轴激励时 q 轴电感在低电流区因磁硬化效应呈现先升后降趋势。这一结果表明,电机控制算法需嵌入动态电感模型以补偿交叉耦合,从而提升转矩输出精度与效率。

(2) 通过对比 SMC、GO 硅钢和 NO 硅钢三种材料的电磁特性,揭示了其核心差异:GO 硅钢定子电机初始电感最高、转矩密度最大但 d 轴饱和速度最快;NO 硅钢定子电机成本低、电磁性能适中、抗饱和能力适中且工艺成熟;SMC 定子电机高频低损、抗饱和能力强、各向同性且磁场分布均匀,适合复杂磁路。

(3) 尽管 GO 硅钢定子电机在静态工况下具有理论性能优势,但 SMC 定子电机因高频低损、抗饱和性强及三维磁路适应性,更契合无人机动态负载、高频脉宽调制及紧凑化设计需求。试验

结果表明,SMC 定子电机在 $\theta_i = 30^\circ \sim 60^\circ$ 时综合性能较好,相较于 GO 硅钢定子电机更有优势。

利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献

刘宇豪、黄平林进行了方案设计,刘宇豪进行了试验研究、内容总结与论文撰写,黄平林、陈先锋参与了论文的审核与修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

The scheme design was carried out by Liu Yuhao and Huang Pinglin. The experiment study, content summary and paper writing were carried out by Liu Yuhao. The manuscript was reviewed and revised by Huang Pinglin and Chen Xianfeng. All authors have read and approved the final version of the manuscript for submission.

参考文献

[1] 米彦青,袁兵,邹成智. 电动飞机电推进用永磁

- 同步电机无传感器控制技术综述[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(1): 60-76.
- MI Y Q, YUAN B, ZOU C Z. Review on sensorless control technologies of permanent magnet synchronous motors for electric aircraft propulsion system [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2024, 51(1): 60-76.
- [2] 颌浩浩, 吴纪康, 鲍久圣, 等. 新能源汽车驱动电机技术现状及混合励磁研究进展[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(1): 36-51.
- XIE H H, WU Q K, BAO J S, et al. Current status of new energy vehicle drive motor technology and research progress on hybrid excitation [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2025, 52(1): 36-51.
- [3] 殷允飞, 上官凌霄, 侯福金, 等. 基于二阶滑模自抗扰控制的道路融冰除雪系统水泵电机优化策略[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(3): 29-38.
- YIN Y F, SHANGGUAN L X, HOU F J, et al. High-performance second-order sliding mode control strategy for water pump motor of melting and snow removal system via disturbance observer [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2023, 50(3): 29-38.
- [4] CAO W. Overview of electric motor technologies used for more electric aircraft (MEA) [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, 59(9): 3523-3531.
- [5] 尹崇, 高郭池, 全敬泽. 电动飞机对于飞行性能及飞行程序的影响研究[J]. 中国设备工程, 2021(1): 91-92.
- YIN C, GAO G C, QUAN J Z. Impact of electric aircraft on flight performance and flight procedures [J]. *China Plant Engineering*, 2021, (1): 91-92.
- [6] 黄俊, 杨凤田. 新能源电动飞机发展与挑战[J]. 航空学报, 2016, 37(1): 57-68.
- HUANG J, YANG F T. Development and challenges of electric aircraft with new energy [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2016, 37(1): 57-68.
- [7] 耿振, 李光友. 轴向磁通永磁同步电机发展综述[J]. 微特电机, 2015, 43(9): 88-93+99.
- GENG Z, LI G Y. Overview of axial flux permanent-magnet machine micromotor [J]. *Small & Special Electrical Machines*, 2015, 43(9): 88-93+99.
- [8] 黄允凯, 周涛, 董剑宁, 等. 轴向永磁电机及其研究发展综述[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(1): 192-205.
- HUANG Y K, ZHOU T, DONG J N, et al. An overview on developments and researches of axial flux permanent magnet machines [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(1): 192-205.
- [9] 金良宽, 徐松, 谭磊鑫. 新能源汽车用轴向磁通电机设计与分析[J]. 微电机, 2020, 53(5): 10-14.
- JIN L K, XU S, TAN L X. Design and analysis of axial flux motors for new energy vehicle [J]. *Micromotors*, 2020, 53(5): 10-14.
- [10] 陈晨, 王义珑. 基于效率及温升的轴向磁通永磁电机优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(6): 1686-1694.
- CHEN C, WANG Y L. Optimal design of axial-flux permanent magnet motors based on the efficiency and temperature rise [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(6): 1686-1694.
- [11] JUN H W, SEOL H S, JU L. Design of high power density TVC driving motor for space launch vehicle using Halbach magnet array structure [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2018, 28(99): 1-5.
- [12] LIN H P, GUO H, QIAN H. Design of high-performance permanent magnet synchronous motor for electric aircraft propulsion [C]//2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems, Jeju, 2018.
- [13] ZHANG Z R, GENG W W, LIU Y, et al. Feasibility of a new ironless-stator axial flux permanent magnet machine for aircraft electric propulsion application [J]. *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*, 2019, 3(1): 30-38.
- [14] CUI S M, SUN P L, KUANG Z, et al. A thermal-electromagnetic coupled motor design flow for electric aircraft propeller drive application [C]//2017 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific, Harbin, 2017.
- [15] 谭麟. 软磁复合材料压制成型工艺及其影响因素研究综述[J]. 化工设计通讯, 2025, 51(3): 4-6.
- TAN L. Review of research on soft magnetic composite pressing process and its influencing factors [J]. *Chemical Engineering Design Communications*, 2025, 51(3): 4-6.
- [16] 赵国新, 孔德财, 高晓林. 软磁复合材料与硅钢

- 片材料的永磁电机性能差异研究[J]. 电工技术学报, 2018, 33(增刊1): 75-81
- ZHAO G X, KONG D C, GAO X L. Performance difference study on permanent magnet synchronous motor based on soft magnetic composite material and silicon steel sheet [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(S1): 75-81.
- [17] 韦福东, 王建辉, 刘朋鹏. 基于软磁复合材料的超高速永磁同步电机电磁设计分析[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(1): 78-82.
- WEI F D, WANG J H, LIU P P. Electromagnetic design and analysis of ultra-high-speed motor based on soft magnetic composite material [J]. Electric Machines & Control Application, 2021, 48(1): 78-82.
- [18] 范伟. SMC 磁性槽楔低速永磁同步电机设计及性能分析[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2023.
- FAN W. Design and performance analysis of low-speed permanent magnet synchronous motor with SMC magnetic slot wedge [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2023.
- [19] 王艾萌. 新能源汽车新型电机的设计及弱磁控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.
- WANG A M. A Novel PM Machine Design and Flux-Weakening Control for Renewable Energy Vehicle [M]. Beijing: China Machine Press, 2014.
- [20] 刘平宙, 方丹, 王兆岩. 静态场永磁同步电机交直流电感的有限元分析[J]. 微电机, 2013, 46(8): 24-28.
- LIU P Z, FANG D, WANG Z Y. Static field of PMSM quadrature axis and direct axis inductance finite element analysis [J]. Micromotors, 2013, 46(8): 24-28.
- [21] 肖玉坤, 戴正文, 邹琳, 等. 永磁电机交、直流电感特性有限元分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2018, 41(9): 1196-1200+1243.
- XIAO Y K, DAI Z W, ZOU L, et al. Analysis of direct-axis and quadrature-axis inductance characteristics of permanent magnet motor by finite element method [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2018, 41(9): 1196-1200+1243.
- [22] 周涛, 黄允凯, 董剑宁, 等. 定子无磁轭模块化轴向永磁电机的优化设计[J]. 电机与控制应用, 2014, 41(7): 20-26.
- ZHOU T, HUANG Y K, DONG J N, et al. Optimization design of a stator yokeless and modular axial flux permanent magnet machine [J]. Electric Machines & Control Application, 2014, 41(7): 20-26.
- [23] 宋成龙, 陆艳君, 安辉, 等. 轴向分段式双爪极永磁电机设计与分析[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(6): 107-116.
- SONG C L, LU Y J, AN H, et al. Design and analysis of axially segmented double claw pole permanent magnet motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(6): 107-116.
- [24] GUO Y G, ZHU J G, WATTERSON P A, et al. Comparative study of 3-D flux electrical machines with soft magnetic composite cores [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, 39(6): 1696-1703.
- [25] PEI R L, ZENG L B, LI S H, et al. Studies on grain-oriented silicon steel used in traction motors [C]//2017 20th International Conference on Electrical Machines and Systems, Sydney, 2017.
- [26] LEI G, ZHU J G, GUO Y G, et al. Robust design optimization of PM-SMC motors for six sigma quality manufacturing [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2013, 49(7): 3953-3956.

收稿日期: 2025-04-16

收到修改稿日期: 2025-05-20

作者简介:

刘宇豪(1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向为永磁同步电机电磁分析, yhao_liu@foxmail.com;

* 通信作者: 黄平林(1976-), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为机电控制、特种电机开发及电力电子技术, pinglinhuang@ujs.edu.cn。