

基于磁网络法的外转子永磁同步电机的磁场分析

边旭, 边宏远, 梁艳萍

(哈尔滨理工大学 电气与电子工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 由于磁网络法具有计算周期短, 能快速调节电机尺寸以优化设计需求的优点, 因此在永磁同步电机的磁场分析中应用较为广泛。针对传统磁网络法对外转子永磁同步电机磁场模拟过程中难以准确考虑漏磁分布的问题, 基于网格单元建立了能够准确模拟永磁体极间和定子槽内漏磁分布的外转子永磁同步电机等效磁网络模型, 该模型考虑了铁心材料的非线性与转子动态问题, 相较于传统磁网络法该模型优势在于不需要预设磁通走向且对漏磁计算具有更高的精确度。以一台3 kW的外转子永磁同步电机为例, 采用此方法对其磁场进行计算与分析, 并且对漏磁模拟的影响因素进行讨论与分析, 通过实验对计算结果进行验证。研究表明, 基于网格单元建立的等效磁网络模型能够准确模拟主磁及漏磁分布。

关键词: 外转子永磁同步电机; 磁网络法; 漏磁分布; 磁通; 非线性

DOI: 10.15938/j.emc.2025.02.010

中图分类号: TM341

文献标志码: A

文章编号: 1007-449X(2025)02-0096-09

Magnetic field analysis of external rotor permanent magnet synchronous motor based on magnetic circuit network

BIAN Xu, BIAN Hongyuan, LIANG Yanping

(School of Electrical and Electronic Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: Magnetic circuit network has the advantages of shortening calculation period and adjusting the motor's size to optimize the design requirements quickly. Therefore, this method is widely used in the magnetic field analysis of permanent magnet synchronous motor. It is difficult for traditional magnetic circuit network to accurately consider the leakage magnetic field distribution of external rotor permanent magnet synchronous motor. To solve this problem, the equivalent magnetic network (EMN) model of external rotor permanent magnet synchronous motor (ERPMSM) was established based on grid elements, which can accurately simulate the magnetic leakage distribution between the poles of permanent magnets and in the stator slots. Compared with the traditional magnetic circuit network, the advantages of this model are that it does not need to preset the flux direction and has higher accuracy for magnetic leakage calculation. Taking a 3 kW external rotor permanent magnet synchronous motor as an example, meanwhile, the EMN was used to calculate and analyze its magnetic field. The factors that affect the simulation of magnetic leakage field were discussed and the calculation results were verified by experiment. The results show that the EMN model based on grid elements can accurately simulate the distribution of principal magnetic flux and leakage magnetic field distribution.

收稿日期: 2024-08-09

基金项目: 黑龙江省自然科学基金(YQ2023E038)

作者简介: 边旭(1988—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为多物理场仿真分析以及电机设计;

边宏远(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为永磁电机磁网络分析;

梁艳萍(1963—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电机电磁理论与电磁设计、大型发电设备机电能量转换机理与电磁场分析计算。

通信作者: 边旭

Keywords: external rotor permanent magnet synchronous motor; magnetic circuit network; leakage magnetic field distribution; magnetic flux; nonlinearity

0 引言

外转子永磁同步电机除了具有体积小、重量轻、转矩大的优点外,还具有结构简单和空间利用率高等优势^[1]。这使得外转子永磁同步电机被广泛应用于电动汽车、电梯行业、工业自动化等领域^[2]。外转子永磁同步电机多用分数槽集中绕组形式,具有槽漏磁大的特点^[3],较大的槽漏磁会降低电机的功率因数和最大转矩,增加涡流损耗^[4]。所以精确考虑漏磁对电机的影响十分重要,也为后续计算涡流损耗奠定基础。

磁网络法具有计算精度高、计算速度快和工程适用性强等优点,非常适用于电机的磁场问题分析。目前等效磁网络法有两种,一种是基于节点的传统等效磁网络法,另一种是基于网格的新型等效磁网络法。从建模形状可以看出,基于网格单元的等效磁网络法比基于节点的等效磁网络法建模具有更高的通用性和精确性^[5]。基于节点的传统磁网络法是将整个槽内部等效成1个或2个节点与磁导相连,此方法主要针对主磁通处理较为精细而对漏磁处理较为粗略。文献[6]用传统磁网络建立盘式电机等效磁网络模型,其对永磁体内周边缘漏磁、外周边缘漏磁和极间漏磁进行详细的计算与分析,但是没有对槽内漏磁建模与分析。文献[7-8]用传统法建立等效磁网络模型时,将槽内等效成2个节点与1个漏磁导,没有对槽内漏磁进行精确等效处理。文献[9]基于传统磁网络法提出一种改进的三维等效磁网络模型。该模型考虑了模块化定子齿和转子极靴不均匀饱和,磁极间漏磁、磁极端部漏磁和定子槽内漏磁,对于槽内漏磁等效成矩形、梯形和半圆结构,但是由于其槽内节点太少导致对槽内漏磁计算不够精确。文献[10]在建立了等效磁网络模型时,由于磁路的简化导致忽略了大部分漏磁的影响,导致最终计算出的电感和电动势与有限元法相比有一定误差。目前对于基于节点法等效磁网络模型普遍对漏磁考虑不够精细。

基于网格的等效磁网络法正在逐渐应用于实现对复杂槽形漏磁更精确的计算分析。此种方法是将

电机剖分成大量的网格,每个网格根据网格形状等效成相同形状的磁导,每个节点表示周围的网格区域^[11]。文献[12]提出一种引入混合介质网格的通用磁网络模型,但是没有对槽内进行网格剖分从而没有考虑槽漏磁的影响。文献[13]对电机分别用基于节点的传统磁网络法和基于网格的新型磁网络法建立等效磁网络模型,由于新型磁网络法对复杂结构及漏磁处理更加精确,所以气隙磁密、电动势等结果与有限元法更加接近。文献[14-15]基于网格单元建立等效磁网络模型并考虑了局部饱和与漏磁的影响,但电机槽型为矩形槽,并不是针对集中绕组的平行齿槽,对于槽口、槽肩的网格剖分和槽内漏磁的处理会更为复杂。因此需要采用磁网络法针对集中绕组的外转子永磁同步电机的漏磁模拟进行详细的分析。

本文基于网格单元建立能够准确模拟永磁体极间和定子槽内漏磁分布的外转子永磁同步电机等效磁网络模型,对其磁场进行计算与分析,并且对漏磁模拟的影响因素进行讨论,最后,通过实验对计算结果进行验证。

1 外转子永磁同步电机的拓扑结构及基本参数

外转子永磁同步电机的拓扑结构如图1所示。由图1可知,电机为外转子内定子结构。外部由转子铁心和永磁体组成,转子铁心内侧装有10块永磁体,内部由定子铁心和绕组构成,齿间有12个槽。样机主要参数如表1所示。

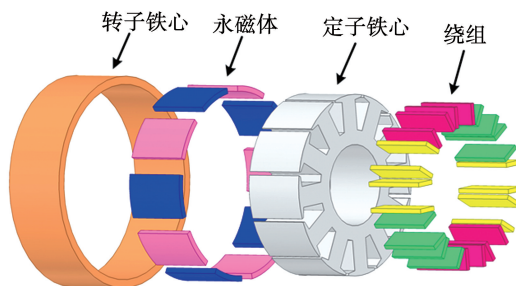


图1 外转子永磁同步电机结构图

Fig.1 Structure of ERPMSM

表1 电机主要参数

Table 1 Main parameters of the motor

电机参数	数值	电机参数	数值
额定功率/kW	3	额定电压/V	320
额定转速/(r/min)	3 000	频率/Hz	250
极对数	5	定子槽数	12

2 外转子永磁同步电机等效磁网络模型

2.1 等效磁网络模型

整个电机等效磁网络模型如图2所示,其中包括1 312个节点和2 583个支路。定子齿部由矩形磁导单元构成,其余部分均由扇形磁导单元构成。图3出示了一个槽内的等效磁网络模型图。

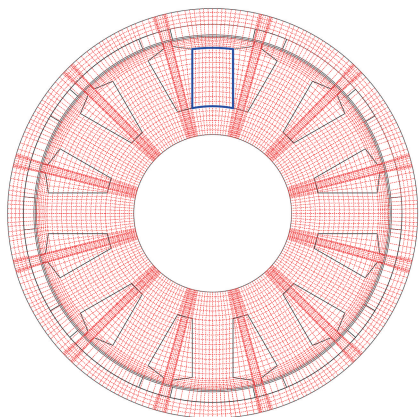


图2 外转子永磁同步电机等效磁网络模型

Fig.2 EMN model of ERPMSM

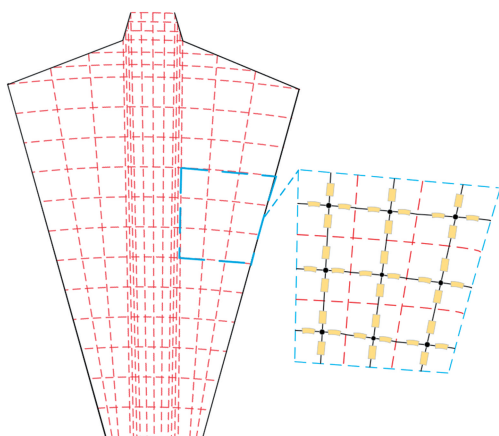


图3 槽内等效磁网络模型

Fig.3 Modeling of EMN in slots

利用节点电压法对等效磁网络模型中磁导、磁

势与磁通之间的关系可表示为

$$\begin{bmatrix} G(1,1) & -G(1,2) & \cdots & -G(1,n) \\ -G(2,1) & G(2,2) & \cdots & -G(2,n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -G(n,1) & -G(n,2) & \cdots & G(n,n) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U(1) \\ U(2) \\ \vdots \\ U(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi(1) \\ \Phi(2) \\ \vdots \\ \Phi(n) \end{bmatrix}. \quad (1)$$

式中: n 为等效磁网络模型的节点个数; $U(i)$ ($i=1, \dots, n$)为第 i 个节点的磁动势; $\Phi(i)$ ($i=1, \dots, n$)为第 i 个节点的磁通; $G(i,j)$ 为节点 i 与节点 j 之间的磁导,即:

$$\left. \begin{aligned} G(i,j) &= G(j,i); \\ G(i,i) &= -\sum_{j=1, j \neq i}^n G(i,j). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: $G(i,j)$ 表示节点 i 与节点 j 之间的互磁导; $G(i,i)$ 表示节点 i 的自磁导。式(1)也可以简化为矩阵形式为

$$\mathbf{GU} = \Phi. \quad (3)$$

式中: $\mathbf{G}$ 为等效磁网络模型的磁导矩阵; $\mathbf{U}$ 为节点的磁势矩阵; Φ 为节点的磁通矩阵。

2.2 等效磁网络模型参数计算方法

磁导网络模型由许多网格单元组成,每个网格单元由2个径向磁导与2个切向磁导组成十字形网格单元。网格单元的优势对于复杂结构与形状的电机也能灵活地剖分且不需要考虑网格单元的排列方法。因此,本文等效磁网络模型的磁导部分采用十字形网格单元构建。十字形网格单元磁导由网格单元形状决定,网格单元形状如图4所示。

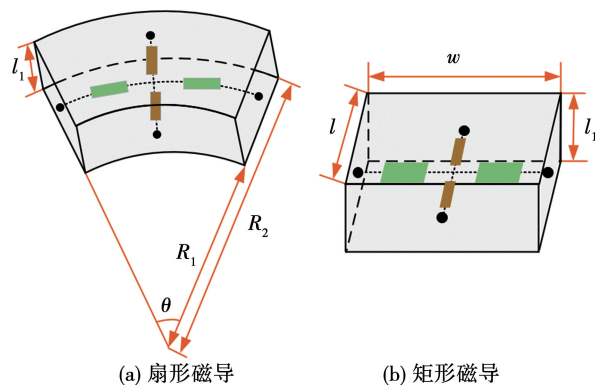


图4 网格单元形状

Fig.4 Grid cell shape

扇形单元的切向磁导为

$$G_q = \frac{2\mu_0\mu_r l_1 \ln \frac{R_2}{R_1}}{\theta}. \quad (4)$$

扇形单元的径向磁导为

$$G_j = \frac{2\mu_0\mu_r l_1 \theta}{\ln \frac{R_2}{R_1}} \quad (5)$$

矩形单元的切向磁导为

$$G_q = \frac{2\mu_0\mu_r l_1 w}{l} \quad (6)$$

矩形单元的径向磁导为

$$G_j = \frac{2\mu_0\mu_r l_1 l}{w} \quad (7)$$

式中: μ_0 为真空磁导率,其值为 $4\pi \times 10^{-7}$ H/m; μ_r 为相对磁导率; l_1 为轴向长度; R_1 为扇形内径; R_2 为扇形外径; θ 为扇形圆心角度; w 为矩形的宽度; l 为矩形的长度。

在求解节点电流方程前,需要给出节点磁通矩阵 Φ 的初值,其与支路磁势源及磁势源所在支路的磁导有关,只有存在磁势源的支路两端的节点有值,其余均为0,如图5所示,具体计算公式为:

$$\left. \begin{aligned} \Phi(i) &= F_{j,i} G(i,j) + F_{m,i} G(i,m); \\ \Phi(j) &= -F_{j,i} G(i,j); \\ \Phi(m) &= -F_{m,i} G(i,m). \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: $F_{j,i}$ 、 $F_{m,i}$ 为支路磁势源; $G(i,j)$ 为节点*i*与*j*之间的磁导。

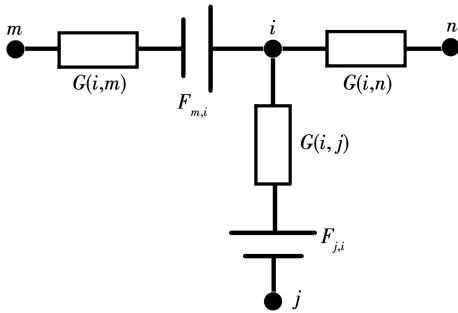


图5 支路示意图

Fig. 5 Schematic diagram of branch road

电枢绕组在通电情况下和永磁体均为电机的磁场提供磁动势。外转子电机绕组采用的是集中式绕组,其绕组磁动势等效模型如图6所示。因此,绕组磁动势 F_n 可表示为

$$F_n = \oint H dl = N_c i \quad (9)$$

式中: F_n 表示绕组磁动势; H 为磁场强度; N_c 为电枢绕组匝数; i 为电枢电流。

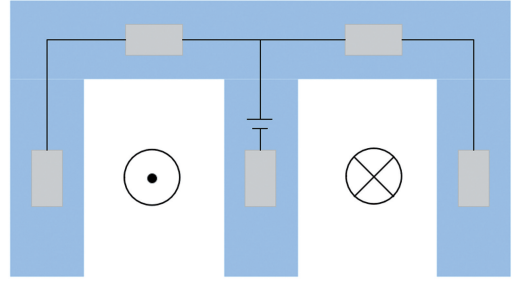


图6 绕组磁动势等效模型

Fig. 6 Equivalent model of winding magnetic potential

对于永磁体区域的等效磁网络模型均由永磁体的磁动势与其相应的磁导串联而成,永磁体磁动势和磁导可表示为:

$$\left. \begin{aligned} F_{pm} &= H_c h_{pm} = \frac{B_{rm} h_{pm}}{\mu_{pm} \mu_0}; \\ G_{pm} &= \mu_{pm} \mu_0 l_1 \frac{l_{pm}}{h_{pm}}. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中: F_{pm} 为永磁体的磁动势; B_{rm} 为永磁体的剩磁密度; h_{pm} 为永磁体的厚度; μ_{pm} 为永磁体的相对磁导率; μ_0 为真空磁导率,其值为 $4\pi \times 10^{-7}$ H/m; G_{pm} 为永磁体的磁导; l_1 为电机轴向长度; l_{pm} 为瓦形永磁体径向厚度中间处的周向长度。

2.3 等效磁网络模型求解方法

根据式(1)求得的节点磁势,从而计算出节点*i*与节点*j*之间的磁密,计算公式为

$$B_{new} = \frac{[U(i) - U(j)] G(i,j)}{S_{ij}} \quad (11)$$

式中: B_{new} 为新的磁密值; S_{ij} 为节点*i*与节点*j*之间网格单元的截面积。

非线性铁磁材料中,由于局部过饱和的存在,磁场强度对其磁导率存在较大影响,所以在对模型求解过程中准确考虑铁心的饱和效应是必要的。但是,式(11)得出的 B_{new} 存在落在 $B-H$ 曲线范围外的可能。因此,为了解决此问题,对 B_{new} 进一步修正为:

$$B_{correct} = \begin{cases} B_{min}, B_{new} < B_{min}; \\ b B_{new} + (1-b) B_{pre}, B_{min} < B_{new} < B_{max}; \\ B_{max}, B_{new} > B_{max}. \end{cases} \quad (12)$$

式中: $B_{correct}$ 为矫正后的磁感应强度; B_{min} 与 B_{max} 为 $B-H$ 曲线上磁密的最小值和最大值; B_{pre} 为前一步迭代求解的磁密值; b 为松弛因子。

得到 B_{correct} 后根据 $B-H$ 曲线得到新的磁导率 μ_{new} 为:

$$\left. \begin{aligned} H_e &= \frac{(B_{\text{correct}} - B_n)(H_{n+1} - H_n)}{B_{n+1} - B_n} + H_n; \\ \mu_{\text{new}} &= \frac{B_{\text{correct}}}{H_e} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中: H_e 为新的磁场强度; μ_{new} 为新的磁导率; (H_n, B_n) 和 (H_{n+1}, B_{n+1}) 为 $B-H$ 曲线上相邻的两点。

然后,用新的磁导率 μ_{new} 替代当前的磁导率并进入下一步迭代过程,当满足下式时停止迭代:

$$|B_{\text{correct}}^{(k+1)} - B_{\text{correct}}^{(k)}| < \varepsilon. \quad (14)$$

式中 ε 为最大误差,此处将 ε 设置为 0.001。

若式(14)成立,则进入下一个转子位置的等效磁网络迭代运算。根据上述分析,迭代流程如图7所示。

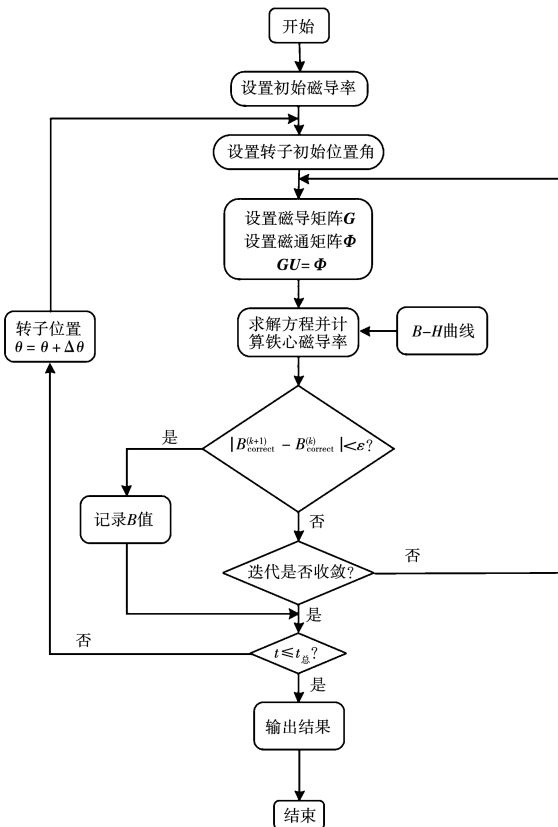


图7 迭代过程流程图

Fig.7 Iterative process flowchart

3 外转子永磁同步电机磁场对比分析与验证

为了对比磁网络模型中漏磁处理精度对磁场分析结果的影响,本文分别在空载与额定负载条件下

选择不同漏磁模型与基于节点的传统磁网络法的漏磁进行对比,并且对比了槽内不同网格数量对结果的影响,同时与有限元的结果进行对比验证。其中有限元模型、网格剖分及采样点如图8所示。

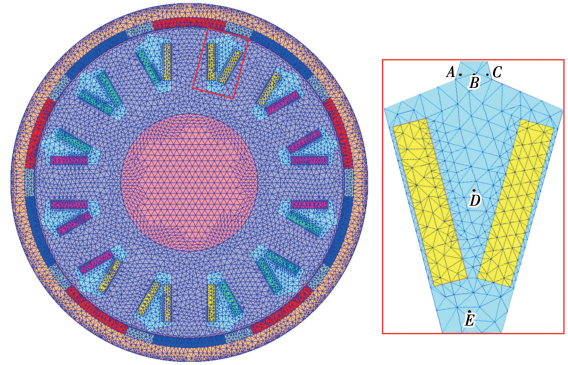


图8 网格剖分及采样点

Fig.8 Grid profiles and sampling points

采用二维瞬态场路耦合法对模型进行求解,满足的求解方程为:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) &= -J_z + \sigma \frac{\partial A_z}{\partial t}; \\ A_z|_r &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

式中: μ 为磁导率; A_z 为矢量磁位 Z 轴分量; J_z 为电流密度 Z 轴分量; σ 为电导率。

3.1 气隙磁密分析

图9和图10分别为空载和额定负载条件下通过有限元法得到的电机磁场分布。由图可知,该外转子永磁同步电机磁场呈5对极分布。额定负载条件下由于电枢磁场存在,磁力线会发生畸变,磁密最大点位于转子轭部。

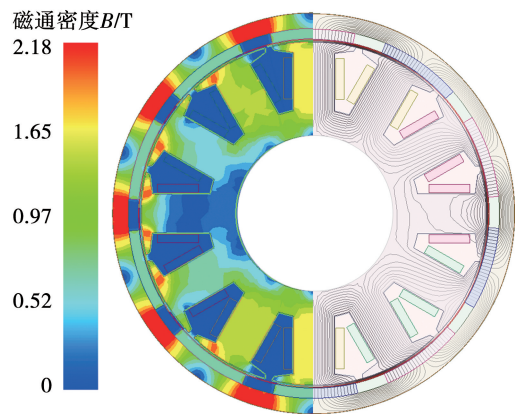


图9 空载条件下外转子永磁同步电机磁场分布

Fig.9 Field distribution of ERPMMSM under no-load condition

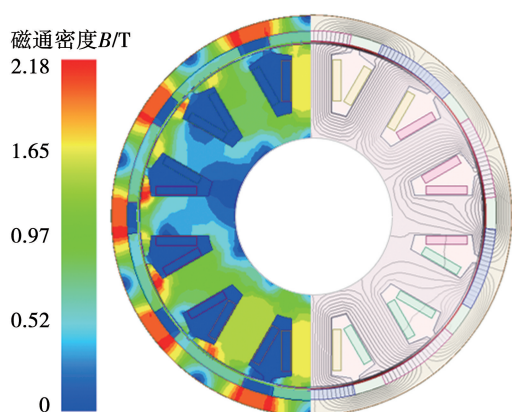


图10 额定负载条件下外转子永磁同步电机磁场分布

Fig. 10 Field distribution of ERPMSM under rated load

图11和图12分别为空载与额定负载情况下槽内为 K 个节点时与FEM的气隙磁密对比图。当 $K=1, 9, 35, 195$ 时,空载条件下磁密最大相对误差分别为9.4%、6.3%、3.6%、1.1%,额定负载条件下磁密最大相对误差分别为9.8%、6.6%、3.6%、1.2%。由结果可知,槽内节点数量对气隙磁密存在一定的影响,槽内节点越多,磁网络法结果与FEM结果越吻合。

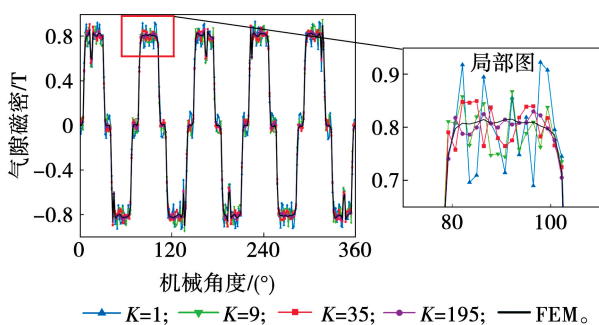


图11 空载气隙磁密

Fig. 11 Air gap magnetic density

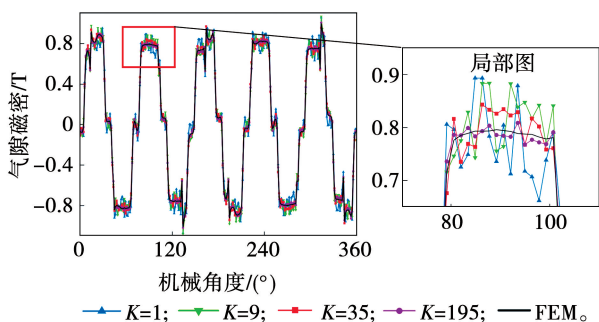


图12 额定负载气隙磁密

Fig. 12 Rated load air gap magnetic density

为了进一步验证结果的精确性,对气隙磁密进行傅里叶分解。图13为空载情况下槽内为 K 个节点时与FEM的气隙磁密傅里叶分解对比图。5、15、25、35、45次谐波在 $K=1$ 时与FEM存在最大相对误差,其误差分别为0.81%、8.8%、9.3%、10.8%、12.4%。在 $K=195$ 时与FEM存在最小相对误差,其误差分别为0.05%、0.91%、0.52%、0.49%、0.37%。

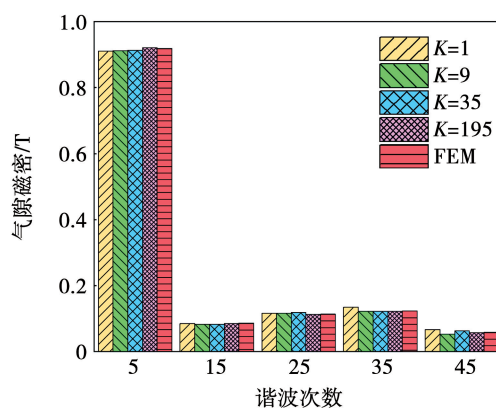


图13 空载气隙磁密谐波

Fig. 13 No-load air gap density harmonics

图14为额定负载情况下槽内为 K 个节点时与FEM的气隙磁密傅里叶分解对比图。5、15、25、35、45次谐波在 $K=1$ 时与FEM存在最大相对误差,其误差分别为0.98%、14.3%、17.4%、10.7%、11.5%。在 $K=195$ 时与FEM存在最小相对误差,其误差分别为0.03%、0.99%、0.45%、0.39%、0.24%。

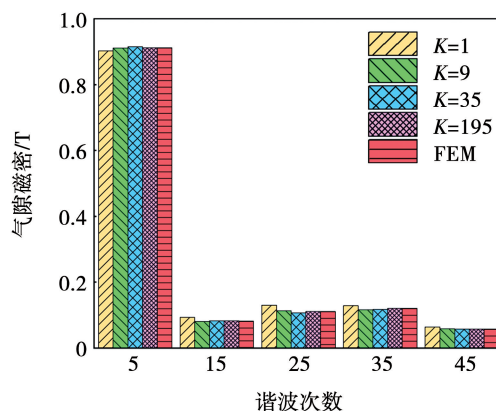


图14 额定负载气隙磁密谐波

Fig. 14 Rated load air gap density harmonics

3.2 定子槽内漏磁密分析

图15和图16分别为空载和额定负载条件下1个槽内的磁场分布。由图可知,额定负载条件下比空载条件下槽内磁密大很多,槽内磁密分布不均匀,槽口磁密最大,槽底磁密最小。

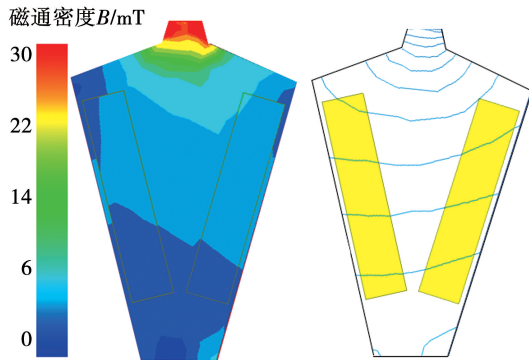


图15 空载条件下槽内磁场分布

Fig. 15 Magnetic field distribution in the tank under no-load conditions

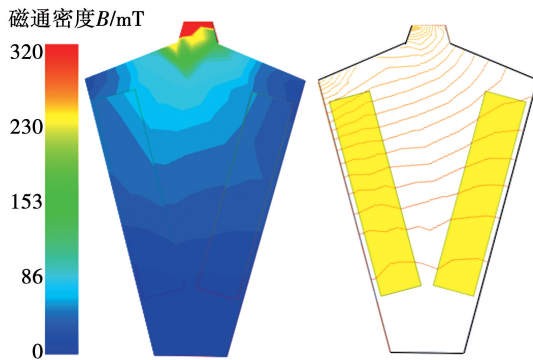


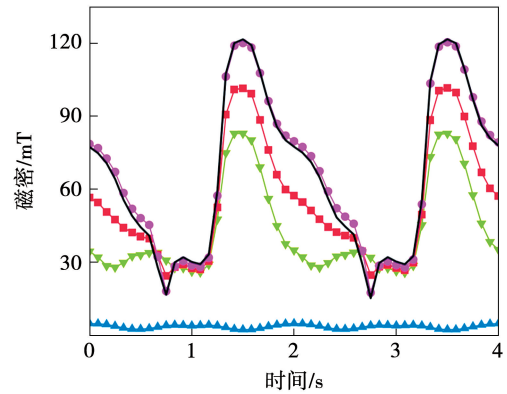
图16 额定负载条件下槽内磁场分布

Fig. 16 Magnetic field distribution in the tank under rated load conditions

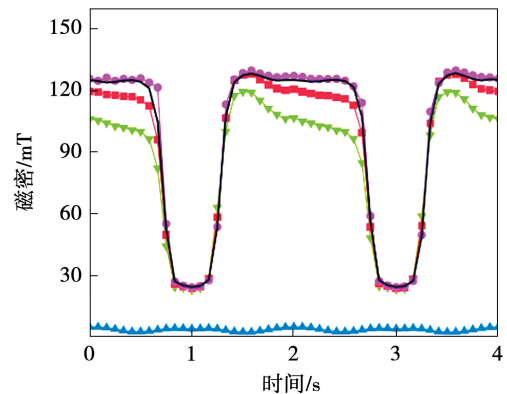
图17为空载条件下槽内节点数量为 K 时不同位置的节点瞬态磁密与FEM对比图。 $K=1$ 和 $K=195$ 时节点A的最大相对误差分别为93.6%和1.3%,节点B的最大相对误差分别为91.8%和1.2%,节点C的最大相对误差分别为94.7%和1.4%。

图18为额定负载条件下槽内节点数量为 K 时不同位置的节点瞬态磁密与FEM对比图。 $K=1$ 和 $K=195$ 节点A的最大相对误差分别为84.3%和1.7%,节点B的最大相对误差分别为82.8%和1.5%,节点C的最大相对误差分别为85.1%和

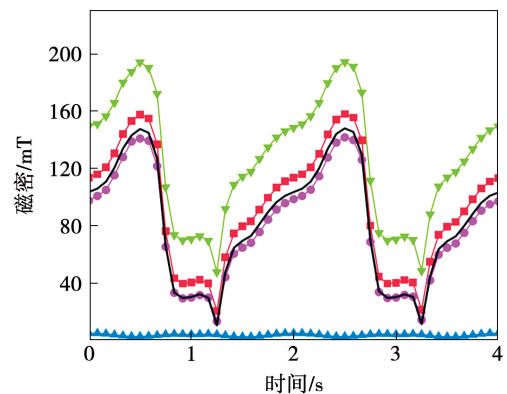
1.4%。节点D的最大相对误差分别为38.1%和1.1%。节点E的最大相对误差分别为89.6%和1.4%。



(a) 节点A瞬态磁密曲线



(b) 节点B瞬态磁密曲线



(c) 节点C瞬态磁密曲线

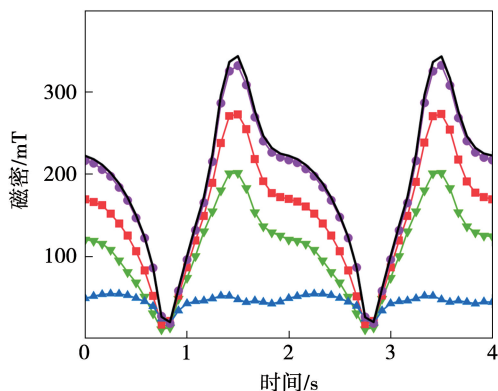
— $K=1$; — $K=9$; — $K=35$; — $K=195$; — FEM。

图17 空载条件下槽内节点瞬态磁密曲线

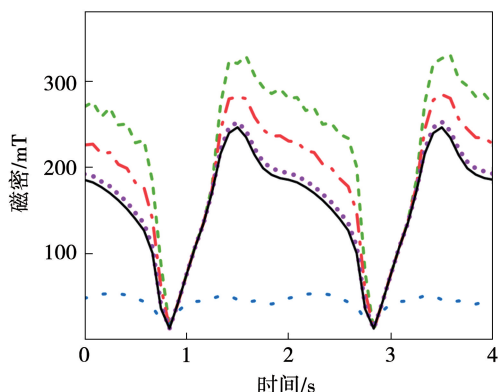
Fig. 17 Transient density curve of nodes in slot under no-load conditions

槽内节点越多,与FEM误差越小。 $K=1$ 时节点磁密为整槽平均磁密。而槽口处磁密比平均磁密大很多,槽底处磁密比平均磁密小很多。所以建立基于网格的等效磁网络模型,精确考虑槽内漏磁分

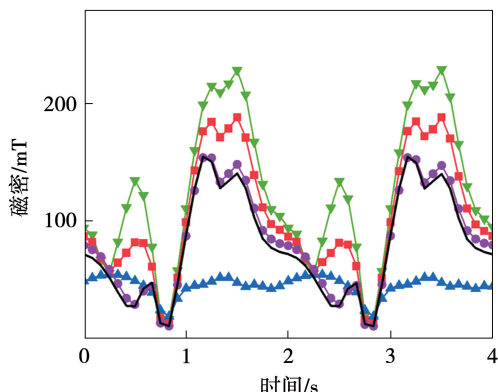
布是重要的。



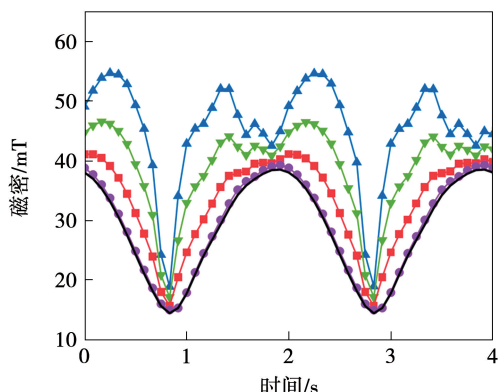
(a) 节点A瞬态磁密曲线



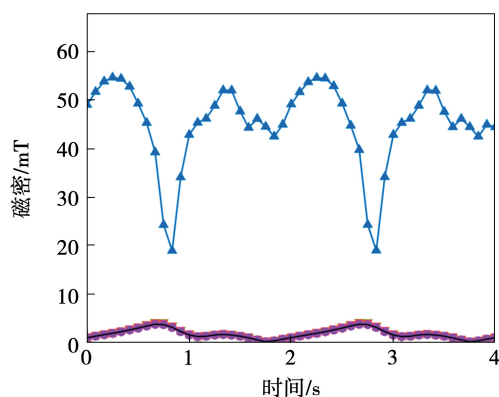
(b) 节点B瞬态磁密曲线



(c) 节点C瞬态磁密曲线



(d) 节点D瞬态磁密曲线



(e) 节点E瞬态磁密曲线

— $K=1$; — $K=9$; — $K=35$; — $K=195$; — FEM。

图 18 额定负载条件下槽内节点瞬态磁密曲线

Fig. 18 Transient density curves of nodes in slots under rated load conditions

3.3 实验验证

为了验证磁网络模型的正确性,进行了样机电磁性能的实验测试。样机实验平台如图 19 所示,实验过程是在电机在额定频率、额定电压条件下空载运转达到相对稳定时,改变外加端电压大小,当其空载电流达到最小时,此时的外加端电压可近似认为电机的空载电动势。



图 19 样机实验平台

Fig. 19 Prototype experiment platform

本文将空载条件下有限元法与磁网络法的 A 相电动势进行对比,如图 20 所示。并且在不同漏磁处理形式下数据进行对比, $K=1$ 时相对误差为 10.7%, $K=195$ 时相对误差为 0.38%,实测值与有限元相对误差为 0.33%。可以发现槽内漏磁考虑越精细,与 FEM 误差越小。

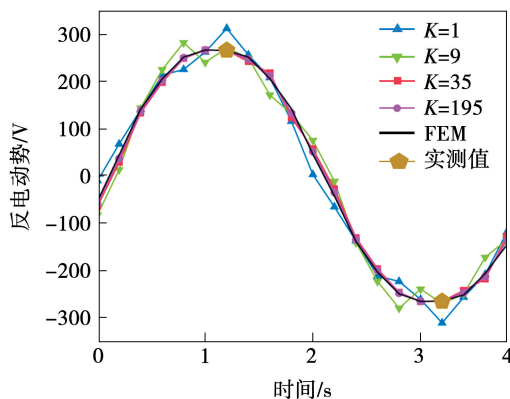


图20 电动势波形

Fig.20 EMF waveform

4 结论

本文以一台 3 kW 外转子永磁同步电机为例。针对传统磁网络法对漏磁模拟不精确问题,本文基于网格法建立的等效磁网络模型能够准确模拟主磁及漏磁分布。分别在空载与额定负载条件下利用有限元法与磁网络法进行磁场对比分析,并进行实验验证磁网络模型的正确性。具体结论如下:

1) 基于网格法建立的等效磁网络模型相较于传统磁网络法,其优势在于对复杂结构的磁场计算具有更高的精确度。本文将槽内剖分成 195 个网格,精确的计算出槽口、槽身及槽底的漏磁大小,与实验值相比相对误差为 0.57%。

2) 在磁网络法模拟中, $K=1$ 、195 时气隙磁密与 FEM 最大相对误差分别为 9.8%、1.2%。 $K=1$ 、195 时槽口磁密与 FEM 最大相对误差分别为 82.8%、1.5%,槽中磁密与 FEM 最大相对误差分别为 38.1%、1.1%,槽底磁密与 FEM 最大相对误差分别为 89.6%、1.4%。当考虑槽内漏磁分布时,槽内网格单元越多,漏磁分布考虑越精确,其气隙磁密曲线与 FEM 越吻合。基于网格单元建立的等效磁网络模型能够准确模拟主磁及漏磁分布,为应用磁网络法精确计算外转子永磁同步电机磁场分布奠定了理论基础。

参考文献:

- [1] ZUO Shuguang, LIN Fu, WU Xudong. Noise analysis, calculation, and reduction of external rotor permanent-magnet synchronous motor [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(10): 6204.
- [2] BONTU S, ARAFAT A, CHOI S. Comparisons of rare-earth and

rare-earth-free external rotor permanent magnet assisted synchronous reluctance motors [J]. IEEE Transaction on Industrial Electronics, 2017, 64(12): 9729.

- [3] DENG Wenzhe, ZUO Shuguang, CHEN Wei, et al. Comparison of eccentricity impact on electromagnetic forces in internal- and external-rotor permanent magnet synchronous motors [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2022, 8(1): 1242.
- [4] CAO Wenping, HUANG Rongqing, WANG Hui, et al. Analysis of inter-turn short-circuit faults in brushless DC motors based on magnetic leakage flux and back propagation neural network [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2023, 38(4): 2273.
- [5] CAO Donghui, ZHAO Wenxiang, JI Jinghua, et al. A generalized equivalent magnetic network modeling method for vehicular dual-permanent-magnet vernier machines [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2019, 34(4): 1950.
- [6] 于慎波, 江爽, 夏鹏澎. 盘式电机气隙漏磁与空载气隙磁密的解析计算[J]. 电机与控制学报, 2021, 25(7): 61.
- YU Shenbo, JIANG Shuang, XIA Pengpeng. Analysis and calculation for air gap leakage and open circuit air gap flux density of disc motor [J]. Electric Machines and Control, 2021, 25(7): 61.
- [7] 陈威, 吴桂初, 方攸同. 基于绕组分布函数理论和动态磁网络的两种内置式永磁牵引电机解析建模方法[J]. 电工技术学报, 2020, 35(S2): 377.
- CHEN Wei, WU Guichu, FANG Youtong. Two analytical models based on winding function theory and dynamic reluctance mesh for interior permanent magnet traction machines [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(S2): 377.
- [8] 夏云彦, 周洲, 邵远亮, 等. 基于动态磁网络法大型感应电机阻抗参数及起动特性计算[J]. 电工技术学报, 2024, 39(14): 4341.
- XIA Yunyan, ZHOU Zhou, SHAO Yuanliang, et al. Calculation of impedance parameters and starting characteristics of large induction motor based on dynamic magnetic network [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(14): 4341.
- [9] 佟文明, 王萍, 吴胜男, 等. 基于三维等效磁网络模型的混合励磁同步电机电磁特性分析[J]. 电工技术学报, 2023, 39(14): 692.
- TONG Wenming, WANG Ping, WU Shengnan, et al. Electromagnetic performance analysis of a hybrid excitation synchronous machine based on 3D equivalent magnetic network [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 39(14): 692.
- [10] 张昌锦, 陈志辉, 梅庆泉, 等. 横向磁通永磁同步电机非线性动态等效磁网络模型分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(1): 307.
- ZHANG Changjin, CHEN Zhihui, MEI Qingxiao, et al. Nonlinear dynamic equivalent magnetic network model analysis of transverse flux permanent magnet synchronous motor [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(1): 307.

- line junction temperature monitoring of power module based on aging compensation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(12): 3705.
- [21] LI Yang, AGYAKWA P A, JOHNSON C M. Physics-of-failure lifetime prediction models for wire bond interconnects in power electronic modules[J]. IEEE Transactions on Device & Materials Reliability, 2013, 13(1): 11.
- [22] HELD M, JACOB P, NICOLETTI G, et al. Fast power cycling test of IGBT modules in traction application [C]//2002 IEEE Proceedings of Second International Conference on Power Electronics and Drive Systems, May 26 - 29, 2002, Singapore. 2002: 1 - 6.
- [23] BAYERER R, HERRMANN T, LICHT T, et al. Model for power cycling lifetime of IGBT modules-various factors influencing lifetime[C]//5th International Conference on Integrated Power Electronics Systems, March 11 - 13, 2008, Nuremberg, Germany. 2008: 1 - 6.
- [24] LIU Zhen, WANG Qing, SONG Chenliang, et al. Similarity-based difference analysis approach for remaining useful life prediction of GaAs-based semiconductor lasers [J]. IEEE Access, 2017, 5: 21512.
- [25] 张晓凤, 王秀英. 灰狼优化算法研究综述[J]. 计算机科学, 2019, 46(3): 30.
- ZHANG Xiaofeng, WANG Xiuying. Comprehensive review of grey wolf optimization algorithm[J]. Computer Science, 2019, 46(3): 30.
- [26] 全国工业过程测量控制和自动化标准化技术委员会. 智能服务 预测性维护 算法测评方法: GB/T 43555—2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.
- [27] 邓二平, 严雨行, 陈杰, 等. 功率器件功率循环测试技术的挑战与分析[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(13): 5135.
- DENG Erping, YAN Yuxing, CHEN Jie, et al. Power cycling test technologies for power semiconductor devices-challenges and analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(13): 5135.
- (编辑: 邱赫男)

·····

(上接第 104 页)

- [11] LIU Chengcheng, WANG Xue, WANG Shaopeng, et al. Magneto-thermal coupling analysis of permanent magnet claw pole machine using combined 3D magnetic and thermal network method [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2022, 32(6): 1.
- [12] 朱旭光, 刘正蒙, 刘国海, 等. 基于混合介质网格的表贴式永磁游标电机通用等效磁网络模型[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(5): 2009.
- ZHU Xuguang, LIU Zhengmeng, LIU Guohai, et al. General equivalent magnetic network model of surface permanent magnet vernier machine based on hybrid medium mesh [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(5): 2009.
- [13] DING Ling, LIU Guohai, CHEN Qian, et al. A novel mesh-based equivalent magnetic network for performance analysis and optimal design of permanent magnet machines [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2019, 34(3): 1337.
- [14] YANG Peipei, LIANG Yanping, BIAN Xu, et al. Probing homotopy continuation method for solving nonlinear magnetic network equations [J]. IEEE Access, 2021, 9(3): 32239.
- [15] BIAN Xu, ZHAO Yan, LIANG Yanping. Electromagnetic network method for transient circulating current calculation of stator transposition windings in large synchronous compensator based on equivalence of local magnetic field [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2022, 37(3): 1825.
- (编辑: 刘琳琳)