DOI:10.11784/tdxbz202507018

考虑磁悬浮轴承损耗的高速永磁同步电机集总参数热网络模型

徐园平，宋成琪，周　瑾，金超武，于　敏
（南京航空航天大学机电学院，南京 210016）

摘　要：磁悬浮永磁同步电机功率密度高、转速快而结构紧凑，冷却裕量相对有限，其内部温度的准确、快速预测对高速安全运行至关重要. 损耗作为系统热源，直接决定温升水平. 以一台额定转速 25 020 r/min 的高速磁悬浮永磁同步电机为对象，针对高速下铁心损耗受非线性磁化和趋肤效应影响而难以精确计算问题，采用变系数 Bertotti 模型进行拟合. 该模型通过引入随磁感应强度变化的动态磁滞损耗幂指数，并在涡流损耗项中综合考虑趋肤效应与材料磁特性非线性，使铁心损耗拟合最大误差控制在 10%以内，有效提高了铁耗计算精度. 此外，构建了 42 节点的磁悬浮轴承和永磁同步电机耦合的集总参数热网络模型（LPTN）. 考虑到磁悬浮轴承结构复杂，将其等效为空心圆柱并采用 T 型热网络结构进行建模，有效降低了建模难度. 通过计算流体动力学（CFD）仿真和满载工况温升实验对模型进行验证. 结果表明：LPTN 耦合模型温度预测值和仿真、实验数据具有良好一致性，证明该模型能够在高速工况下实现对永磁同步电机和磁悬浮轴承温度的快速、准确预测，为系统热设计和温控策略制定提供可靠依据.

关键词：永磁同步电机；磁悬浮轴承；集总参数热网络；热分析
中图分类号：TM351　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0493-2137（2026）11-1176-11

Lumped Parameter Thermal Network Model of a High-Speed Permanent Magnet Synchronous Motor Considering Magnetic Bearing Losses

Xu Yuanping，Song Chengqi，Zhou Jin，Jin Chaowu，Yu Min
（College of Mechanical and Electrical Engineering，Nanjing University of Aeronautics and Astronautics，Nanjing 210016，China）

Abstract：Magnetically suspended permanent magnet synchronous motors（MSPMSMs）feature high power density，high rotational speed，and compact structures，resulting in limited cooling capability. Accurate and rapid prediction of internal temperature is therefore essential for reliable operation. As the heat sources，losses directly determine the level of temperature rise. Taking an MSPMSM with a rated speed of 25 020 r/min as the study object，this work addresses the reduced accuracy of conventional core-loss calculations caused by nonlinear magnetization and skin effects. A variable-coefficient Bertotti model is adopted，in which a dynamic hysteresis loss exponent varying with magnetic flux density is introduced，and the eddy current term incorporates both skin effects and nonlinear magnetic characteristics. This approach limits the maximum iron loss fitting error to within 10%，significantly improving prediction accuracy. Furthermore，a 42-node lumped parameter thermal network（LPTN）model is developed to describe the coupled thermal behavior of the MSPMSM and its magnetic bearings. Considering the structural complexity of the magnetic bearings，they are equivalently modeled as hollow cylinders using a T-type thermal network structure，effectively reducing modeling complexity. The proposed model is validated through computational fluid dynamics simulations and full-load temperature rise experiments. The predicted temperatures show good agreement with both

收稿日期：2025-07-15；**修回日期**：2025-11-25.
作者简介：徐园平（1990—　），男，博士，副教授，ypxu@nuaa.edu.cn.
通信作者：周　瑾，zhj@nuaa.edu.cn.
基金项目：国家重点研发计划资助项目（2024YFB3410004）.
Supported by the National Key Research and Development Program of China（No. 2024YFB3410004）.

simulation and experimental results, demonstrating that the model enables fast and accurate temperature prediction for the MSPMSM and its magnetic bearings. This provides a reliable foundation for thermal design and temperature control strategy development.

Keywords: permanent magnet synchronous motor (PMSM); magnetic bearing; lumped parameter thermal network (LPTN); thermal analysis

磁悬浮永磁同步电机由于省去了复杂的齿轮传动箱等中间增速环节，实现直驱，具有旋转速度快、功率密度大、振动噪声小等技术优势. 在离心式鼓风机、压缩机和航空航天等领域具有十分广泛的应用[1-2]. 然而由于高速电机尺寸小、结构紧凑，热源在电机内部更加集中，因此散热困难. 这可能造成绕组绝缘老化[3]、永磁体退磁[4]等现象，从而影响电机正常运行. 因此对电机进行温度预测至关重要.

对电机进行温度分析的方法主要有两大类：数值法和解析法[5-7]. 数值法首先需要建立电机的简化三维模型，在 SpaceClaim 中完成流体域提取后使用 Ansys Fluent 进行面网格和体网格划分，网格的质量直接影响分析结果的准确性. 如果网格质量不达标，需要重新修改模型或细化网格，这往往是一个耗时的迭代过程. 此外数值法还需要对电机的材料属性、热源及边界条件进行设置. 总体而言，数值法的前处理工作复杂且对计算机硬件要求高，因此不适用于对电机进行快速温度分析. 相比之下，解析法中的集总参数热网络法是一种高计算效率、精度良好的温度预测方法[8]. 该方法将电机组件划分为若干个区域，每个区域用一个节点来表示，并以热阻描述节点间及节点与环境之间的热传递路径. 通过构建电机等效热网络模型，将损耗作为热源施加到节点上，可以快速求解系统的温度.

损耗作为热源直接影响温度，因此损耗计算准确性尤为重要. 在几种损耗类型中，铁心损耗计算最为复杂. Steinmetz 模型将铁心损耗表示为磁滞损耗与涡流损耗的叠加形式[9]. 该模型形式简单、便于工程应用，但在描述频率变化下的非线性行为时精度有限. 为解决这一问题，Bertotti 等[10]在模型中引入了附加的经验项，用以更好地拟合中高频条件下的损耗值，但由于铁心损耗项幂指数被固定不变，模型未能反映高频条件下的趋肤效应及有效磁导率频散等情况，导致对实际损耗的计算存在偏差.

随着磁悬浮轴承技术的成熟，其在高速电机中的应用愈发普及，逐步取代传统机械轴承. 磁悬浮轴承实现无接触支承，不仅有效降低摩擦磨损，还能降低电机振动和噪声. 但同时，磁悬浮轴承会带入额外损耗，在进行热分析时必须加以考虑. 当前，文献[11]基于一种等效绕组模型构建了集总参数热网络(lumped parameter thermal network，LPTN)模型，并通过计算流体动力学仿真对其进行了验证. 结果表明，LPTN 模型预测的电机稳态温度与 CFD 仿真结果的最大误差仅为 4.2%，证明了该模型的准确性. 文献[12]利用集总参数热网络法计算速度快的优势得到电机各点温度，将其输入磁等效电路模型来确定电机非线性参数. 文献[13]考虑到永磁体涡流损耗对电机热场的影响，基于集总参数热网络方法，建立了 38 个节点的热网络模型. 与有限元方法对比，温度误差在 4% 以内. 文献[14]采用分层方法计算定子铁心损耗，利用红外热成像仪和 PT100 热电阻验证了 T 型热网络计算电机温度的准确性. 这些研究都证明了 LPTN 模型计算速度快，预测准确性高的特点. 然而，现有文献中 LPTN 模型中采用的铁损输入多基于经典 Bertotti 模型，未能充分考虑高频工况下损耗的变化. 此外高速永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor，PMSM)与磁悬浮轴承耦合状态下的 LPTN 模型和热分析研究较少. 因此有必要使用改进 Bertotti 模型计算铁损并且建立高速永磁同步电机与磁悬浮轴承耦合状态下的 LPTN 模型.

本文以一台 160 kW 磁悬浮永磁同步电机为研究对象，提出面向高速工况下的变系数 Bertotti 铁损模型，显式考虑趋肤效应和有效磁导率随频率与磁密的滚降等影响，从而提高了铁心损耗计算的准确性，为热网络预测温度提供了可靠值. 在热网络建模中，将磁悬浮轴承以热网络形式与电机其他节点耦合，而非仅作为附加热源，使传热路径更符合实际. 由此构建出磁悬浮轴承和电机耦合的 LPTN 模型. 之后通过求解热平衡方程获取各部件的温度分布，在提升计算效率的同时又保证了精度. 最终，通过仿真和实验验证了本文建立的高速永磁同步电机和磁悬浮轴承耦合的 LPTN 模型温度预测的精度.

1　物理模型分析与损耗计算

1.1　高速磁悬浮永磁同步电机物理模型及参数

本文研究的高速磁悬浮永磁同步电机采用一个轴向磁悬浮轴承和两个径向磁悬浮轴承对转子进行

支承和定位，实现无接触悬浮运行. 磁悬浮电机三维模型如图 1 所示. 电机散热方式为自扇风冷，关键参数如表 1 所示.

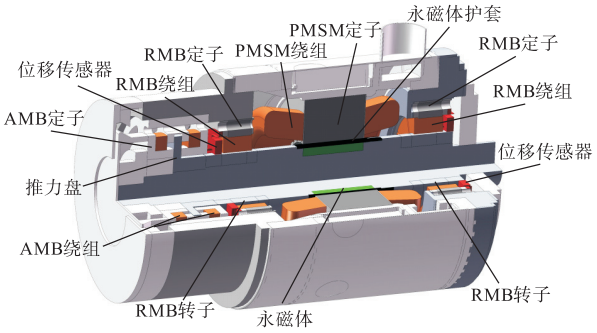


图 1 高速磁悬浮永磁同步电机三维模型

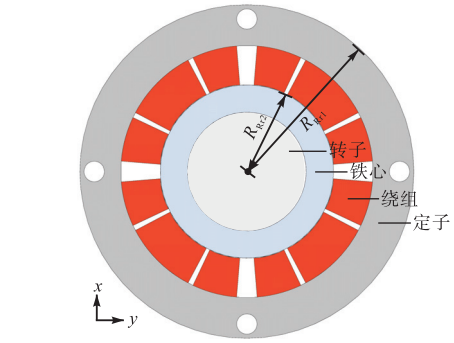
Fig.1 Three-dimensional model of a high-speed magnetically suspended PMSM

表 1 电机的基本参数

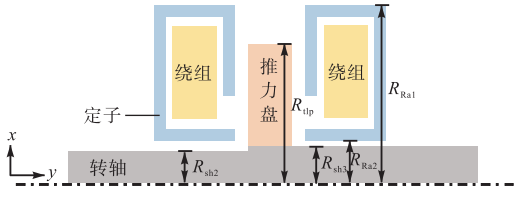
Tab.1 Fundamental parameters of the motor

参数	数值
额定功率/kW	160
额定转速/(r/min)	25 020
极数	2
槽数	24
气隙/mm	4
定子外径/mm	289
定子内径/mm	135
轴向长度/mm	115

径向磁悬浮轴承为 E 型结构，轴向磁悬浮轴承为同心单环结构，如图 2 所示. 磁悬浮轴承通过位移传感器将转轴的位置变化转换为电信号，随后由控制器根据电信号调节线圈中的电流从而改变电磁力，实现对转轴的稳定悬浮. 磁悬浮轴承关键参数如表 2 所示.



(a) 径向磁悬浮轴承



(b) 轴向磁悬浮轴承

图 2 磁悬浮轴承结构示意

Fig.2 Structural schematic of the magnetic bearing

表 2 磁悬浮轴承基本参数

Tab.2 Fundamental parameters of the magnetic bearing

部件	数值/mm
RMB 定子外径 R_{Rr1}	122.5
RMB 定子内径 R_{Rr2}	63.9
AMB 定子外径 R_{Ra1}	137.5
AMB 定子内径 R_{Ra2}	67
AMB 推力盘半径 R_{tlp}	103

1.2 损耗分析

在集总参数热网络中，高速磁悬浮永磁同步电机运行过程中产生的损耗作为热源施加到热网络中，因此损耗的精确计算对温度预测的准确性至关重要. 本节采用解析法和有限元法对磁悬浮轴承和永磁同步电机在额定工况下的损耗进行分析.

1.2.1 绕组铜耗

绕组铜耗是永磁同步电机和磁悬浮轴承的主要损耗来源之一，直接影响电机效率和温升. 铜耗的产生主要源于绕组中电流通过电阻产生的热量，其计算需要考虑温度的影响[15].

$$P_{\text{copper_loss}} = mI^2R \tag{1}$$

式中：$P_{\text{copper_loss}}$ 为绕组损耗；m 为电机相数；I 为绕组电流有效值；R 为相电阻.

$$R = \rho_t \frac{2nl_0}{A_{o1}a_1} \tag{2}$$

式中：ρ_t 为 t 温度时导体的电阻率；n 为电枢绕组每相串联匝数；l_0 为绕组线圈平均半匝长度；A_{o1} 为绕组导线横截面积；a_1 为每相绕组的并联支路数.

导体电阻率与温度有关，在电机运行温度范围内，温度为 t 时的电阻率 ρ_T 的计算式为

$$\rho_T = \rho_{20}\left[1+\alpha\left(t-t_{20}\right)\right] \tag{3}$$

式中：$\rho_{20} = 1.785\times10^{-8}\ \Omega\cdot\text{m}$；$\alpha$ 为导体电阻的温度系数，$\alpha \approx 0.004$；$t_{20} = 20\ ℃$.

1.2.2 铁心损耗

铁心损耗由磁滞损耗、涡流损耗和杂散损耗构成. 考虑 PMSM 高速工况下，磁场频率变化大，趋肤效应的作用导致电机定子叠片 B20AT1500 厚度上涡流的分布不均匀，故采用变系数 Bertotti 损耗分离计算模型[16]，公式为

$$P_{\text{Fe}} = P_{\text{h}} + P_{\text{c}} + P_{\text{e}} = K_{\text{h}}fB_{\text{m}}^{\alpha} + K_{\text{c}}(f)f^2B_{\text{m}}^2 + K_{\text{e}}f^{1.5}B_{\text{m}}^{1.5} \tag{4}$$

式中：K_{h} 表征磁滞损耗系数，K_{e} 表征涡流损耗系数；

K_c 表征杂散损耗系数. 其中与频率有关的涡流损耗系数 $K_c(f)$ 为

$$K_c(f)=k_c\frac{3}{D\sqrt{f}}\frac{\sinh(D\sqrt{f})-\sin(D\sqrt{f})}{\cosh(D\sqrt{f})-\cos(D\sqrt{f})} \tag{5}$$

式中：$k_c=\pi^2\sigma d^2/(6\rho)$，$d$ 为铁心叠片的厚度，σ 为铁心叠片的电导率，ρ 为铁心叠片的质量密度；D 为考虑趋肤效应的铁心损耗系数，$D=d\sqrt{\pi\mu\sigma}$，μ 为铁心叠片的平均磁导率.

为评价模型精度，将不同频率下的实测损耗数据与模型拟合结果逐点对比，计算相对误差，即

$$\varepsilon=\left|\frac{P_{\text{pred}}-P_{\text{exp}}}{P_{\text{exp}}}\right|\times 100\% \tag{6}$$

式中：P_{pred} 为模型拟合值；P_{exp} 为硅钢片实测值.

取其绝对值的最大值作为最大拟合误差，图 3 结果表明，考虑趋肤效应的变系数 Bertotti 损耗分离计算模型在整体拟合精度上优于常系数模型，其最大拟合误差由 17.7% 降至 6.7%.

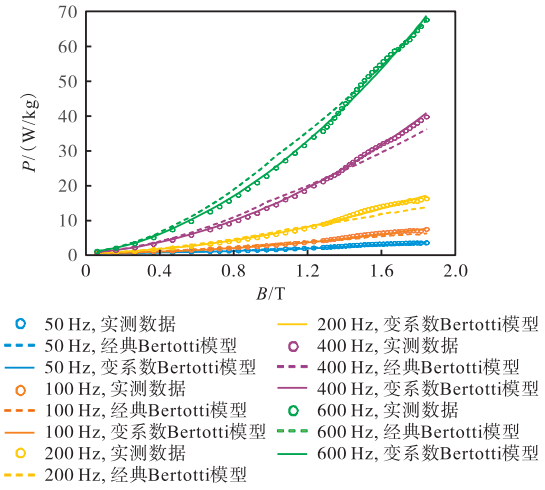


图 3　B20AT1500 硅钢片铁损模型拟合曲线对比

Fig.3　Comparison of core-loss model fitting curves for the B20AT1500 silicon steel sheet

表 3 为损耗分离计算模型系数.

在高频工况下，采用变系数的 K_e 刻画受到趋肤效应影响导致硅钢片厚度上的涡流分布不均这一现象，从而调整实际损耗中涡流损耗的占比. 由于 3 类损耗系数均是在同一实测硅钢片损耗曲线上拟合得到的，当涡流损耗分配发生变化时，磁滞与杂散损耗项也会随之重新平衡，因此 K_h 和 K_c 的数值亦会发生相应改变.

特别地，NSSN 排布的磁悬浮轴承磁化频率是转频的 2 倍，由于转子旋转及铁心材料的非线性磁化特性，会产生较高的铁心损耗[17]，其中磁滞损耗和涡流损耗随频率增加发生显著改变，在电机总损耗中占据

表 3　损耗分离计算模型系数

Tab.3　Coefficients of loss seperation calculation model

各项损耗系数	Bertotti 模型系数数值	变系数 Bertotti 模型系数数值
K_h	$2.392\,5\times10^{-2}$	$1.021\,5\times10^{-2}$
K_c	3.3×10^{-5}	式(5)
K_e	1.0×10^{-5}	$1.112\,7\times10^{-3}$
α	0.996 75	2.378 55

相当比例. 若忽略或计算不准确，将导致热网络节点温度预测出现明显偏差. 因此，精确计算磁悬浮轴承的损耗对于提高 LPTN 模型对电机关键节点温度预测的准确性尤为重要.

磁悬浮轴承定子和转子均为 20WTG1500 硅钢片，根据厂家测试得到不同磁密和频率下的铁损值(图4)，通过经典 Bertotti 模型进行拟合(图 5)时发现，在 $B=0.4$ T、$f=50$ Hz 时，最大误差达到了 53.713%.

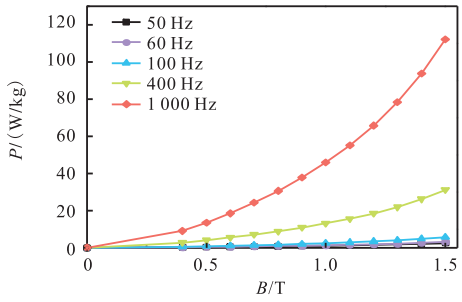


图 4　20WTG1500 硅钢片铁损曲线

Fig.4　Iron-loss curves of 20WTG1500 silicon steel sheet

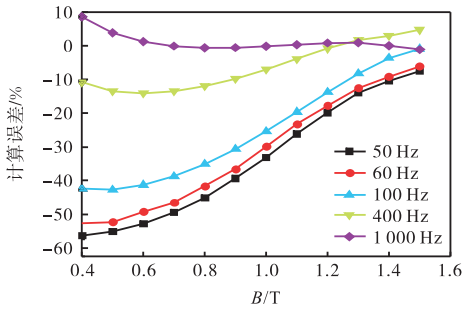


图 5　经典 Bertotti 铁损模型的计算误差

Fig.5　Calculation error of the classical Bertotti iron-loss model

针对拟合精度不足的问题，对经典 Bertotti 模型进行改进，具体表达式为

$$P_{\text{Fe}}=P_h+P_c+P_e=$$
$$K_h f\sum_{k=1}^{\infty}k\left(B_{krm}^{\alpha(B)}+B_{ktm}^{\alpha(B)}\right)+K_c(f,B)f^2\cdot$$
$$\sum_{k=1}^{\infty}k^2\left(B_{krm}^2+B_{ktm}^2\right)+K_e\frac{1}{T}\int_0^T\left\|\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{B}(t)}{\mathrm{d}t}\right\|^{1.5}\mathrm{d}t \tag{7}$$

式中：$\mathrm{d}\boldsymbol{B}(t)=[B_x(t),B_y(t)]^{\mathrm{T}}$，$B_x$、$B_y$ 为铁心中的径向

和切向磁通密度；$B_{k\mathrm{rm}}$、$B_{k\mathrm{tm}}$ 为 k 次谐波的旋转磁场分解为两个正交磁场的幅值；$\alpha(B)$ 为磁滞损耗项的非线性磁滞指数. $\alpha(B)$ 采用 Logistic 函数描述材料磁滞特性随磁感应强度变化的非线性特征为

$$\alpha(B)=\alpha_{\mathrm{low}}+\frac{\alpha_{\mathrm{high}}-\alpha_{\mathrm{low}}}{1+\mathrm{e}^{-\gamma(B-B_{\mathrm{c}})}} \tag{8}$$

磁滞损耗来自磁畴壁运动，在低磁感应强度区以磁畴壁可逆弯曲并伴少量不可逆去钉扎为主，回线面积近似与 B^2 呈正比；在较高磁感应强度区去钉扎与不可逆翻转逐渐主导，幂指数由 2 平滑过渡到材料特征的 Steinmetz 区间[18]. 磁滞损耗项修正系数 $\alpha(B)$ 将磁滞项的幂指数写成随 B 平滑变化的函数能更真实刻画材料行为.

涡流损耗项中引入频率与磁感应强度相关的修正因子 $K_{\mathrm{c}}(f,B)$，更准确地考虑了趋肤效应及材料磁特性非线性对涡流分布的影响，从而进一步提高损耗预测的精度.

涡流损耗项中的修正因子 $K_{\mathrm{c}}(f,B)$ 表达式为

$$K_{\mathrm{c}}(f,B)=\frac{3}{d}\frac{\sinh(D\sqrt{f})-\sin(D\sqrt{f})}{\cosh(D\sqrt{f})-\cos(D\sqrt{f})}\cdot\frac{k_{\mathrm{c}}}{\sqrt{\pi\mu_{\mathrm{eff}}(f,B)\sigma f}} \tag{9}$$

在硅钢叠片中，随频率升高，磁场在厚度方向的扩散受限，材料被磁化的难度上升，等效表现为磁导率下降. 为表征这一现象，借鉴 Debye 型弛豫频散的思想[19]，将静态非线性磁导 $\mu_0\mu_{\mathrm{r}}(B)$ 与一个弛豫型低通滚降因子相乘，定义频率修正的有效磁导率，即

$$\mu_{\mathrm{eff}}(f,B)=\frac{\mu_0\mu_{\mathrm{r}}(B)}{1+\left(f/f_{\mathrm{c}}\right)^n} \tag{10}$$

式中：μ_0 为真空磁导率；$\mu_{\mathrm{r}}(B)$ 为材料的相对磁导率，随磁感应强度 B 呈非线性变化；f_{c} 为转折频率；$n\in[1,2]$，为滚降斜率. 当 $f<f_{\mathrm{c}}$，$\mu_{\mathrm{eff}}\approx\mu_0\mu_{\mathrm{r}}(B)$ 回到静态磁导；当 $f>f_{\mathrm{c}}$，μ_{eff} 呈现高频段幅值衰减. 反映磁场在高频下难以深入材料内部.

为确定 f_{c} 的物理量级，考虑硅钢片在厚度方向的电磁扩散方程，即

$$\frac{\partial B(y,t)}{\partial t}=\frac{1}{\sigma\mu}\frac{\partial^2 B(y,t)}{\partial y^2} \tag{11}$$

由尺度分析可得，磁场要穿透厚度 d 需要的扩散时间尺度，即

$$\tau_d\approx C\sigma\mu d^2 \tag{12}$$

在正弦稳态下，趋肤深度 $\delta_{\mathrm{s}}=(\pi f\sigma\mu)^{-1/2}$. 令 $\delta_{\mathrm{s}}\approx d$ 可得到转折频率的近似表达式为

$$f_{\mathrm{c}}\approx\frac{1}{\pi\sigma\mu d^2} \tag{13}$$

引入上述修正因子 $K_{\mathrm{c}}(f,B)$，能够更加精确地反映铁芯材料内部磁场与涡流分布在不同频率和磁通密度条件下的变化规律，尤其适合高频、高磁密工况下的磁悬浮轴承及高速永磁同步电机铁芯损耗的精确计算.

此外，该修正因子中所采用的有效磁导率 $\mu_{\mathrm{eff}}(f,B)$ 能够动态地捕捉频率增加导致磁场向材料表面集中的趋肤效应.

异常损耗与磁畴(磁畴壁运动引起的非线性磁化现象)密切相关，通常呈现出与频率和磁通密度乘积的 1.5 次幂关系.

通过对经典 Bertotti 模型的改进，最大误差可以降低到 8% 以内，提高了拟合精度，如图 6 所示. 受测试设备限制，本文采用的硅钢片铁心损耗曲线来源于常温标准测试，所以忽略了温度和应力的影响，此外 $\mu_{\mathrm{eff}}(f,B)$ 仅描述磁导率随频率的幅值衰减，并不包含损耗角的 建模.

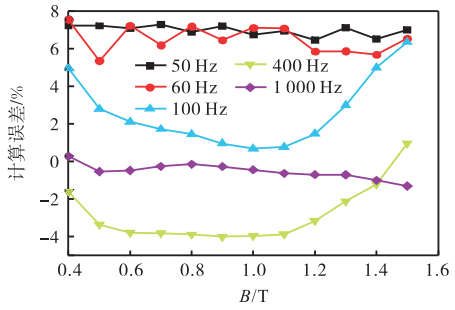


图 6 改进后的 Bertotti 铁损模型的计算误差

Fig.6 Calculation error of the modified Bertotti iron-loss model

通过 Maxwell 软件对径向磁悬浮轴承铁心损耗进行仿真分析发现，基于改进后的 Bertotti 模型所计算的损耗结果更符合实际情况，验证了模型优化的有效性，如图 7 所示. 相比之下，传统的 Bertotti 模型由于参数固定，导致损耗值明显偏高，与实际情况存在较大出入.

径向磁悬浮轴承中的定子与转子均采用叠片结构，而轴向磁悬浮轴承的定子材料采用纯铁，因此两种磁悬浮轴承对于铁心损耗的计算方法有所不同. 结合图 8 磁密云图和磁力线分布可知，最大磁通密度为 1.207 3 T，集中在推力盘气隙区域，也是产生涡流损耗的主要区域. 使用 Maxwell 软件仿真得到轴向磁悬浮轴承铁心损耗为 197.52 W，推力盘处涡流损耗为 86.36 W.

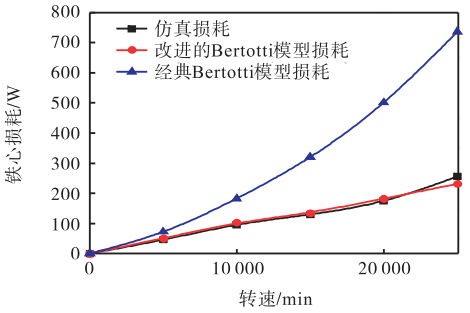


图 7　不同转速下 RMB 铁心损耗对比结果

Fig.7　Comparison results of RMB core-loss at different rotational speeds

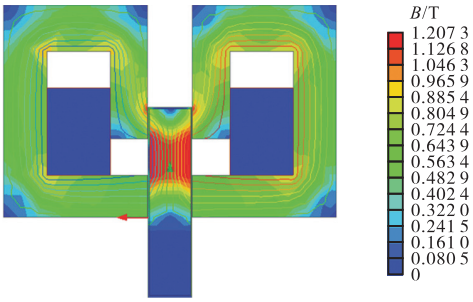


图 8　轴向磁悬浮轴承磁密云图

Fig.8　Magnetic flux density contour of an axial magnetic bearing

1.2.3　转子永磁体涡流损耗

转子永磁体的涡流损耗主要由气隙磁场中的谐波成分引起. 同步旋转的的主磁场不会在永磁体内部感应电流，而与转子不同步的谐波磁场会产生感应电动势，进而在永磁体内部产生涡流从而引起涡流损耗[20].

$$P_{\mathrm{e}}=\frac{1}{T}\int_{T_{\mathrm{e}}}\sum_{i=1}^{k}J_{\mathrm{e}}^{2}\delta_{\mathrm{e}}\sigma_{\mathrm{r}}^{-1}l_{\mathrm{a}}\,\mathrm{d}t \tag{14}$$

式中：P_{e} 为转子涡流损耗；J_{e} 为每个单元中的电流密度；δ_{e} 为单元面积；l_{a} 为转子的轴向长度；σ_{r} 为涡流区域的电导率；T_{e} 为每个单元内交变磁化所对应的时间周期.

1.2.4　风摩损耗

风摩损耗主要发生转子和定子的气隙区域. 根据文献[21]电机气隙和径向磁悬浮轴承气隙处的风摩损耗与转子半径、轴向长度及转速的 4 次方成正比；轴向磁悬浮轴承和推力盘处的风摩损耗与推力盘内外半径及转速 3 次方有关. 在实际分析中，由于气体流动状态复杂、几何结构多样，可以使用 Fluent 仿真得到风摩损耗值.

经过计算分析，磁悬浮永磁同步电机额定工况下的损耗如表 4 所示.

表 4　磁悬浮永磁同步电机系统损耗与热生成量

Tab.4　System losses and heat generation of an MSPMSM

部件	损耗量/W	热生成率/(W/m^3)
电机定子铁心	1 732.00	409 564.33
径向磁悬浮轴承铁心	288.28	235 913.84
轴向磁悬浮轴承铁心	197.52	59 974.25
电机定子绕组	1 056.12	167 074.51
径向磁悬浮轴承绕组	12.69	149 245.71
轴向磁悬浮轴承绕组	8.97	22 840.02
转子永磁体	197.09	360 024.54
永磁同步电机气隙处风摩	381.65	7 037.59
径向磁悬浮轴承气隙处风摩	187.86	10 546.33
推力盘处风摩	288.13	5 645.23

2　集总参数等效热网络建模及仿真

集总参数热网络其核心依据为热路法. 在集总参数热网络模型中，电机的各个结构单元被视为热节点，节点间热交换路径用热阻来表征，从而形成节点热导矩阵 $\boldsymbol{G}$[22]. 设节点总数为 N，节点间的热阻为 $R_{i,j}$，则节点热导矩阵 $\boldsymbol{G}$ 可定义为

$$\boldsymbol{G}=\begin{bmatrix}\sum_{k=1}^{N}\frac{1}{R_{1,k}} & -\frac{1}{R_{1,2}} & \cdots & -\frac{1}{R_{1,N}}\\ -\frac{1}{R_{2,1}} & \sum_{k=1}^{N}\frac{1}{R_{2,k}} & \cdots & -\frac{1}{R_{2,N}}\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\ -\frac{1}{R_{N,1}} & -\frac{1}{R_{N,2}} & \cdots & \sum_{k=1}^{N}\frac{1}{R_{N,k}}\end{bmatrix} \tag{15}$$

当 LPTN 模型达到热平衡时，节点的稳态温升分布向量 $\boldsymbol{T}$ 可由各节点的损耗向量 $\boldsymbol{W}$ 和热导矩阵 $\boldsymbol{G}$ 确定：

$$\boldsymbol{T}=\boldsymbol{G}^{-1}\boldsymbol{W} \tag{16}$$

式中：$\boldsymbol{T}$ 为温度向量；$\boldsymbol{W}$ 为热源向量.

建模时，遵循集总参数热网络法的快速参数化原则，将磁悬浮轴承部分等效成空心圆柱(图 9)，采用 T 型等效热网络图(10)，磁悬浮轴承热阻公式如式(17). 电机多为平壁和圆筒壁组成，采用平壁热传导模型和圆筒壁热传导模型[23].

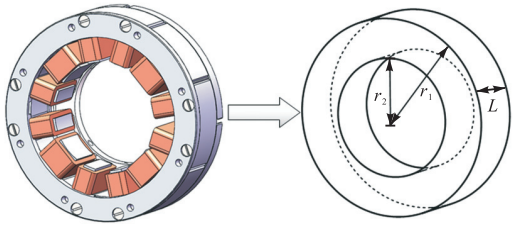


图 9　径向磁悬浮轴承等效图

Fig.9　Equivalent diagram of the radial magnetic bearing

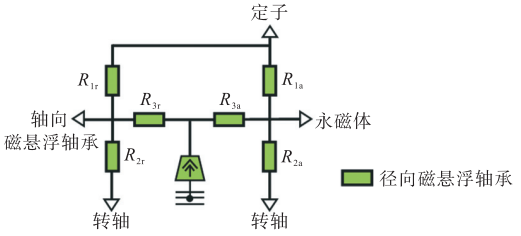


图 10 径向磁悬浮轴承集总参数热网络

Fig.10 Lumped parameter thermal model of the radial magnetic bearing

$$\begin{cases} R_{1a}=R_{2a}=\dfrac{L}{2\pi k_a k_s\left(r_1^2-r_2^2\right)} \\ R_{3a}=\dfrac{-L}{6\pi k_a k_s\left(r_1^2-r_2^2\right)} \\ R_{1r}=\dfrac{1}{4\pi k_r k_s L}\left[1-\dfrac{2r_2^2\ln\left(\dfrac{r_1}{r_2}\right)}{r_1^2-r_2^2}\right] \\ R_{1r}=\dfrac{1}{4\pi k_r k_s L}\left[1-\dfrac{2r_2^2\ln\left(\dfrac{r_1}{r_2}\right)}{r_1^2-r_2^2-1}\right] \\ R_{3r}=\dfrac{-1}{8\pi k r_r k_s L\left(r_1^2-r_2^2\right)}\left[r_1^2-r_2^2-\dfrac{4r_1^2r_2^2\ln\left(\dfrac{r_1}{r_2}\right)}{\left(r_1^2-r_2^2\right)}\right] \end{cases} \tag{17}$$

式中：k_a 为轴向热导率；k_r 为径向热导率；k_s 为磁悬浮轴承面积占所在同心圆环面积比例.

平壁热传导模型和圆筒壁热传导模型，相应的计算方程为

$$R_\lambda=\frac{\Delta T}{\phi}=\begin{cases}\dfrac{\delta}{\lambda S}\\ \dfrac{1}{2\pi\lambda l}\ln\left(\dfrac{d_2}{d_1}\right)\end{cases} \tag{18}$$

式中：ΔT 为模型的边界温差；ϕ 为流经模型的热流量；δ 为平壁模型的厚度；S 为平壁模型的横截面积；l 为圆筒壁模型的长度；d_1 和 d_2 分别为圆筒壁模型的内径和外径.

对流热阻的计算公式为

$$R_\alpha=\frac{\Delta T}{\phi}=\frac{1}{\alpha S} \tag{19}$$

式中 α 为表征该流固界面对流换热能力的对流换热系数.

集总参数热网络模型的节点分布如图 11 所示. 其中 1 ~ 9 为转轴节点，10 ~ 13 为轴向磁悬浮轴承和推力盘节点，14 ~ 16、19 ~ 21 为径向磁悬浮轴承节点，17、18 为永磁体和碳纤维护套节点；22 ~ 25、29、30 为轴承基座节点，32 ~ 35、39 和 40 为轴承组件节点，26 ~ 28 和 36 ~ 38 为电机定子部分节点，31、41、42 为电机外壳节点.

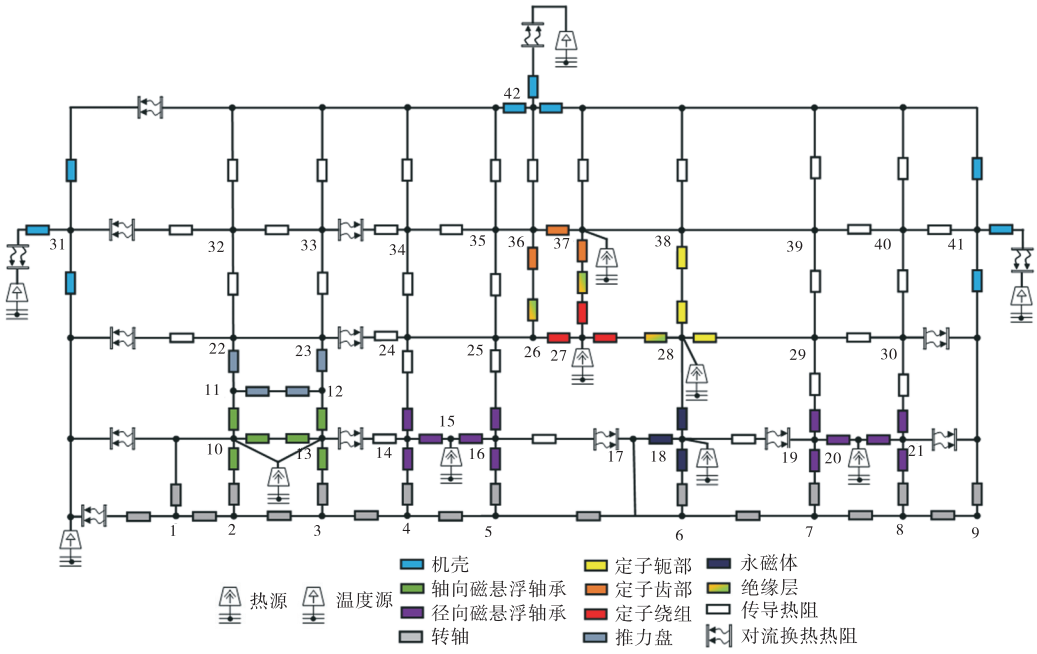


图 11 高速磁悬浮永磁同步电机 LPTN 模型

Fig.11 High-speed MSPMSM LPTN model

在搭载 i5-13400F@2.50 GHz 处理器和 16 G 内存的计算机上，使用 MATLAB 仿真约 10 s，即可得到磁悬浮永磁同步电机各部件温度结果，如表 5 所示.

表 5　LPTN 模型下磁悬浮永磁同步电机温度情况

Tab.5　Temperature profile of the MSPMSM based on the LPTN model

部件	温度/℃
电机绕组	116.3
电机定子齿部	92.3
电机定子轭部	112.3
轴向磁悬浮轴承	56.5
左径向磁悬浮轴承	51.6
右径向磁悬浮轴承	67.5
永磁体	145.0

3　仿真及实验验证

为了验证本文所建立的 LPTN 耦合模型的准确性，首先采用 CFD 方法对磁悬浮永磁同步电机系统在额定工况下的稳态温度场进行了仿真分析. 此外，搭建了高速磁悬浮永磁同步电机实验平台（图 12），采用变频器进行电机驱动，在电机运转的过程中，通过接入功率分析仪监测电机的运行参数. 磁悬浮轴承组件采用自行研制的五自由度磁悬浮轴承控制系统，可实现两个径向磁悬浮轴承和一个轴向磁悬浮轴承的稳定悬浮，同时配合上位机进行实时监控转子悬浮状态. 通过在电机关键部位预先埋入 PT100 热电阻的方式，对各部件的实际温度进行精确测量，为模型验证提供了实验依据. 温度传感器具体位置如图 13 所示. 本文磁悬浮永磁同步电机作鼓风机用途使用，故做满载实验时还需在转子一端安装大直径叶轮，以额定功率 160 kW、额定转速 25 020 r/min 运行，每隔 10 min 记录一次各测点温度，直至连续 10 min 内温升小于 0.5 ℃时，判定系统温度达到稳态.

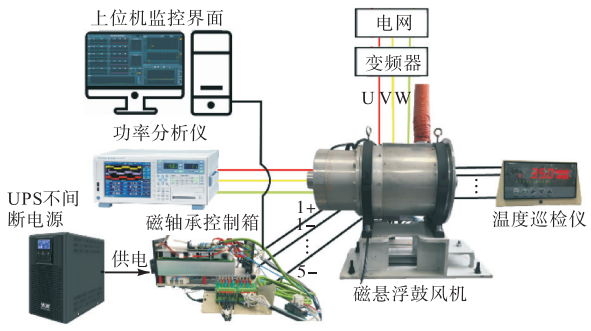


图 12　高速磁悬浮永磁同步电机温升实验设备

Fig.12　Temperature-rise test equipment for high-speed MSPMSM

将前文计算得到的额定工况下的损耗作为热源施加在电机定子绕组、永磁体和磁悬浮轴承等关键部件上，并设置环境温度为 20 ℃，使用 Ansys Fluent 软件进行仿真分析，迭代直至温度稳态收敛.

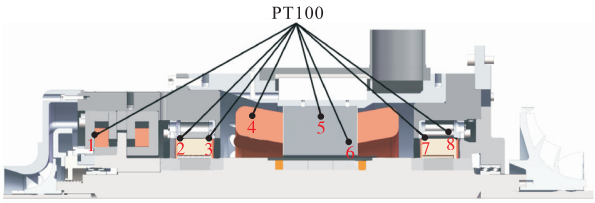


图 13　温度传感器布置位置

Fig.13　Temperature sensor arrangement positions

仿真得到的部分零件稳态温度分布如图 14 ~ 18 所示. 从温度云图可见，电机永磁体温度最高，达到了 154.0 ℃，与 LPTN 耦合模型预测的最高温度位置及趋势一致. 同时，电机定子齿部的温度较轭部低约 20.0 ℃左右，与 LPTN 耦合模型预测的温度分布相符.

由于磁悬浮电机的冷却方式为轴向通风散热，冷却空气从电机左侧进入并经过绕组区域后，其温度逐渐升高，因此右侧径向磁悬浮轴承温度显著高于左侧磁悬浮轴承温度，这与实际结构的热流动特性相符.

磁悬浮永磁同步电机系统在 LPTN 耦合模型和 CFD 法下的稳态温度结果如图 19 所示. 结果表明，LPTN 耦合模型和 CFD 都预测出了永磁体温度最高. 其他电机关键部件的温度结果 LPTN 耦合模型和 CFD 计算出的温度也相差无几. 温度范围差为 0.47 ~ 9.02 ℃. 相对温差范围为 0.839×10^{-3} ~ 5.860×10^{-2}.

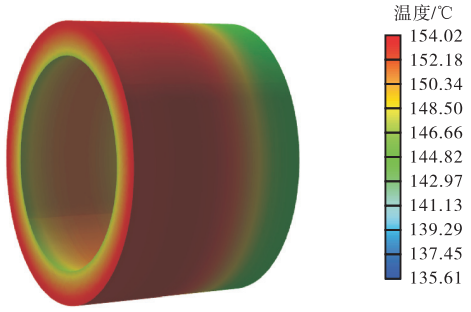


图 14　永磁体温度云图

Fig.14　Temperature field of the permanent magnet

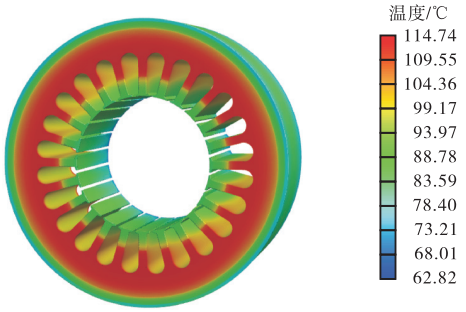


图 15　电机定子温度分布云图

Fig.15　Temperature field of the motor stator

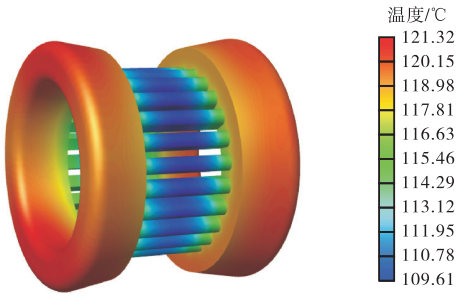


图 16 电机绕组温度分布云图

Fig.16 Temperature field of the motor winding

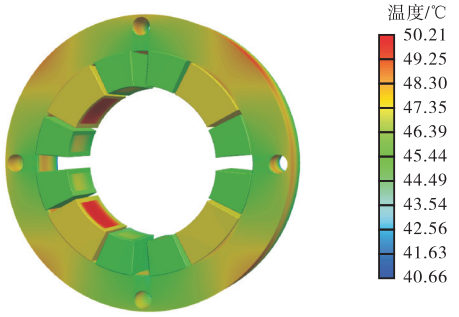


图 17 左径向磁悬浮轴承温度分布云图

Fig.17 Temperature field of the left radial magnetic bearing

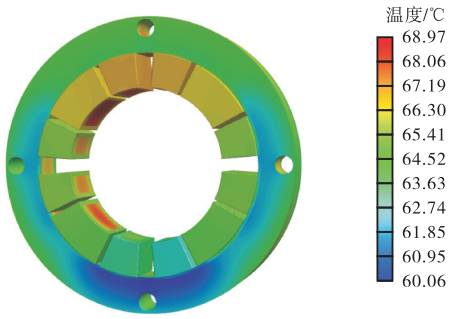


图 18 右径向磁悬浮轴承温度分布云图

Fig.18 Temperature field of the right radial magnetic bearing

验证了建立的 LPTN 耦合模型的准确性.

此外还验证了不考虑磁轴承损耗的 LPTN 模型温度分布,除电机绕组外,定子齿部、定子轭部和永磁体的最高温度都有所下降,其中永磁体温度下降最为明显,较最高温度下降了 21.9 ℃. 同时,由于未考虑磁悬浮轴承的损耗无法准确预测磁轴承部位的温度. 由此证明了变系数损耗模型对磁悬浮轴承铁心损耗计算的准确性,也表明了热分析时磁悬浮轴承的损耗不可忽略.

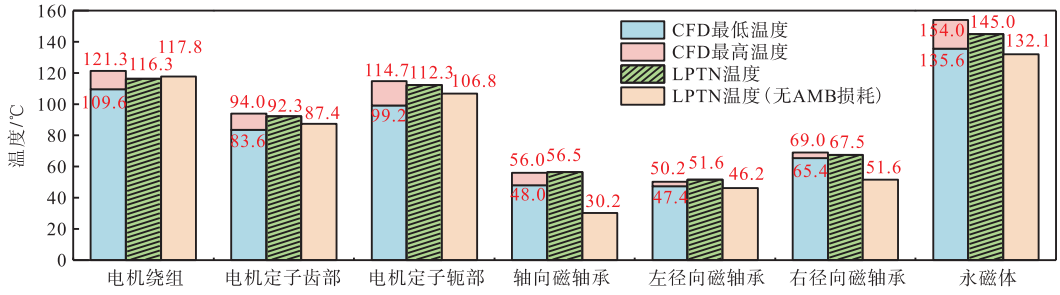


图 19 LPTN 法和 CFD 法温度对比

Fig.19 Temperature distribution comparison between LPTN and CFD

最后,实验测得温升结果如图 20 所示. 由于 PT100 热电阻埋入方式的限制,实验仅能测得磁悬浮轴承和电机部分的温度,且受安装空间和结构布局的约束,每个测点仅能获取单点温度数据. 通过满载实验温升结果得知电机绕组处测得的最高温度为 115.4 ℃,仿真误差 5.13%. 磁轴承处的最大误差也控制在 9% 之内,由此可见 CFD 和 LPTN 耦合模型预测的温度都与实验结果相吻合.

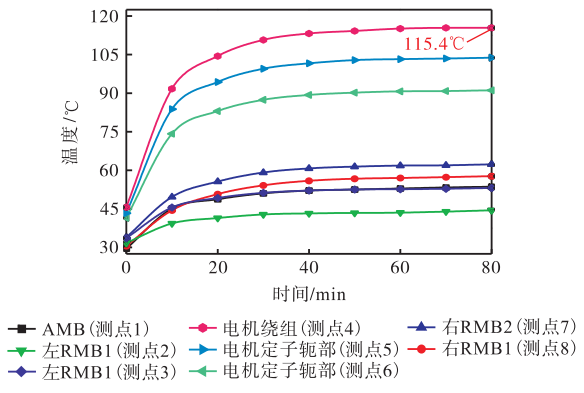


图 20 满载实验温升结果

Fig.20 Temperature rise results from full-load testing

4 结 语

本文以一台 160 kW 的磁悬浮永磁同步电机为研究对象,分析了系统内各类损耗,重点针对高速工况下铁心损耗计算精度不足的问题,提出变系数 Bertotti 铁耗分离模型. 该模型通过引入随磁感应强度动态变化的磁滞损耗幂指数与改进的涡流损耗项,使铁心损耗拟合误差由 17.7% 降至 10.0% 以内,提高了高速磁化条件下铁耗计算精度.

建立的永磁同步电机和磁悬浮轴承耦合的 42 节点集总参数热网络模型，综合考虑系统内部导热和对流换热，实现了基于损耗模型的稳态温度场快速求解. 通过 Ansys Fluent 仿真和满载工况下温升实验对模型进行了验证，结果表明所构建的 LPTN 耦合模型具有较高的温度预测精度：与 CFD 仿真的最大相对误差为 5.860×10^{-2}，与实验数据最大误差在 9% 以内. 此外，求解证明了磁悬浮轴承的损耗不容忽略. 若将其忽略，温度预测的最大误差将达到 46.07%. 后续可以将该 LPTN 耦合模型部署到嵌入式平台中，实现本地实时计算预测，以降低温度传感器成本，同时对热电阻无法或不宜安装的区域给出温度估计.

参考文献：

［1］ 周金宇，朱煜秋. 磁悬浮轴承发展及其研究综述[J]. 微电机，2022，55(6)：93-98.
Zhou Jinyu，Zhu Huangqiu. Development and research summary of magnetic bearings[J]. Micromotors，2022，55(6)：93-98(in Chinese).

［2］ 寇宝泉，赵晓坤，张浩泉，等. 永磁同步电机电磁结构及磁场调节技术的综述分析[J]. 中国电机工程学报，2021，41(20)：7126-7141.
Kou Baoquan，Zhao Xiaokun，Zhang Haoquan，et al. Review and analysis of electromagnetic structure and magnetic field regulation technology of the permanent magnet synchronous motor[J]. Proceedings of the CSEE，2021，41(20)：7126-7141(in Chinese).

［3］ Madonna V，Giangrande P，Lusuardi L，et al. Thermal overload and insulation aging of short duty cycle，aerospace motors[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics，2020，67(4)：2618-2629.

［4］ 唐　旭，王秀和，李　莹，等. 异步起动永磁同步电动机起动过程中永磁体退磁研究[J]. 中国电机工程学报，2015，35(4)：961-970.
Tang Xu，Wang Xiuhe，Li Ying，et al. Demagnetization study for line-start permanent magnet synchronous motor during starting process[J]. Proceedings of the CSEE，2015，35(4)：961-970 (in Chinese).

［5］ Nishanth F，Johnson M，Severson E L. A review of thermal analysis and management of power dense electric machines[C]//2021 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC). Hartford，USA，2021：1-8.

［6］ Zhao J P，Wu X Z. Thermal analysis of permanent Magnet synchronous motor based on equivalent thermal network method[C]//2022 25th International Conference on Electrical Machines and Systems(ICEMS). Chiang Mai，Thailand，2022：1-4.

［7］ 佟文明，孙静阳，舒圣浪，等. 不同数值方法在自扇冷永磁同步电机三维热分析中的应用[J]. 电工技术学报，2017，32(1)：151-159.
Tong Wenming，Sun Jingyang，Shu Shenglang，et al. Application of different numerical methods in 3D thermal analysis for fan-ventilated permanent magnet synchronous machines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2017，32(1)：151-159(in Chinese).

［8］ Liang D W，Zhu Z Q，Dey A. High-fidelity lumped-parameter thermal models for assessing cooling techniques of PMSMs in EV applications[J]. CES Transactions on Electrical Machines and Systems，2025，9(1)：1-14.

［9］ Steinmetz C P. On the law of hysteresis[J]. Proceedings of the IEEE，1984，72(2)：197-221.

［10］ Bertotti G. General properties of power losses in soft ferromagnetic materials[J]. IEEE Transactions on Magnetics，1988，24(1)：621-630.

［11］ Liu B，Yu Z J，Fu J. Thermal modeling and analysis of a HPMSM coupling with magnetic bearings[J]. IEEE Access，2024，12：81362-81373.

［12］ Mukundan S，Dhulipati H，Tjong J，et al. Parameter determination of PMSM using coupled electromagnetic and thermal model incorporating current harmonics[J]. IEEE Transactions on Magnetics，2018，54(11)：8110505.

［13］ Lan Z Y，Wei X H，Chen L H. Thermal analysis of PMSM based on lumped parameter thermal network method[C]//2016 19th International Conference on Electrical Machines and Systems(ICEMS). Chiba，Japan，2016：1-5.

［14］ Chen Q X，Liang D L，Gao L，et al. Hierarchical thermal network analysis of axial-flux permanent-magnet synchronous machine for electric motorcycle[J]. IET Electric Power Applications，2018，12(6)：859-866.

［15］ Han B，Liu X，Huang Z，et al. Loss calculation，thermal analysis，and measurement of magnetically suspended PM machine[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics，2018，65(6)：4514-4523.

［16］ 徐永明，庞松印，刘文辉，等. 高速永磁同步电动机变系数铁耗计算模型[J]. 电机与控制学报，2023，27(7)：174-182.

Xu Yongming, Pang Songyin, Liu Wenhui, et al. Calculation model of core loss with variable coefficient of high-speed permanent magnet synchronous motors[J]. Electric Machines and Control, 2023, 27(7): 174-182(in Chinese).

[17] 闫 旭, 金超武, 熊 峰, 等. 径向磁悬浮轴承铁损特性研究[J]. 测试技术学报, 2020, 34(1): 68-73, 76.
Yan Xu, Jin Chaowu, Xiong Feng, et al. Research on iron loss characteristics of radial suspension bearings[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2020, 34(1): 68-73, 76(in Chinese).

[18] Szumiata T, Rekas P, Gzik-Szumiata M, et al. The two-domain model utilizing the effective pinning energy for modeling the strain-dependent magnetic permeability in anisotropic grain-oriented electrical steels[J]. Materials, 2024, 17(2): 369.

[19] Han M, Dutton R W, Fan S. Model dispersive media in finite-difference time-domain method with complex-conjugate pole-residue pairs[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2006, 16(3): 119-121.

[20] Yu W, Hua W, Qi J, et al. Coupled magnetic field-thermal network analysis of modular-spoke-type permanent-magnet machine for electric motorcycle[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(1): 120-130.

[21] Huang Z Y, Fang J C, Liu X Q, et al. Loss calculation and thermal analysis of rotors supported by active magnetic bearings for high-speed permanent-magnet electrical machines[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(4): 2027-2035.

[22] 王立坤, 郭庆波, 唐勇斌. 大型电机传热系统设计及智能分析方法[M]. 北京: 中国电力出版社, 2024: 34.
Wang Likun, Guo Qingbo, Tang Yongbin. Design and Intelligent Analysis Method of Heat Transfer System for Large Motor[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2024: 34(in Chinese).

[23] Xu Z Y, Xu Y M, Gai Y H, et al. Thermal management of drive motor for transportation: Analysis methods, key factors in thermal analysis, and cooling methods: A review[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2023, 9(3): 4751-4774.

(责任编辑: 王晓燕)