

基于保角映射与热网络法的伺服电机 瞬态温升分析

李晓静^{1*}, 赵国新¹, 王凯东², 郭宇鑫¹, 张广春¹

(1. 沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870;

2. 沈阳新松机器人自动化股份有限公司, 辽宁 沈阳 110169)

Transient Temperature Rise Analysis of Servo Motors Based on Conformal Mapping and Lumped-Parameter Thermal Network

Li Xiaojing^{1*}, Zhao Guoxin¹, Wang Kaidong², Guo Yuxin¹, Zhang Guangchun¹

(1. School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;

2. Shenyang SIASUN Robot & Automation Co., Ltd., Shenyang 110169, China)

Abstract: [Objective] To address the challenge that the traditional lumped-parameter thermal network (LPTN) struggles to characterize the temperature gradient between the winding insulation layer and impregnating varnish, this paper proposes a transient temperature rise calculation method. This method couples conformal mapping with an LPTN to analytically derive the equivalent thermal conductivity of the windings. [Methods] Firstly, a 10 kW surface-mounted permanent magnet synchronous motor was taken as the research object. The conformal mapping method was utilized to transform the arc-shaped isothermal boundary of the copper conductors into a straight-line boundary, thereby mapping the complex non-uniform thermal field inside the winding into a flat-plate thermal field, and the equivalent thermal conductivity of the winding was solved analytically. Then, an equivalent thermal network model was constructed based on the obtained equivalent conduction thermal resistance of the winding, and the copper loss was iteratively updated by considering the influence of the winding resistivity changing with temperature. Finally, the reliability of the analytical model was verified by comparing with finite element analysis (FEA) and temperature rise experiments. [Results] The simulation and experimental results showed that the error between the LPTN and FEA for the winding temperature rise was 1.94%, which proved the high calculation accuracy of the thermal network model in predicting the winding thermal characteristics. The errors between the LPTN model and

FEA/experimental results for housing temperature rise were found to be 3.20% and 6.56% respectively, which further validated the effectiveness of the proposed model.

[Conclusion] The winding homogenization modeling method based on the conformal mapping method proposed in this paper can effectively reflect the thermal characteristics of the winding while ensuring the calculation efficiency, and can be extended to the thermal analysis of other motors. In addition, the analysis of the influence of the stator inner and outer diameter ratio on the transient temperature rise of the motor shows that the transient temperature rise of the motor can be effectively suppressed by reasonably allocating the proportion of copper consumption and iron consumption.

Key words: lumped-parameter thermal network; conformal mapping method; transient temperature rise; surface-mounted permanent magnet synchronous motor

摘 要: 【目的】针对传统热网络法(LPTN)难以表征绕组绝缘层与浸渍漆之间温度梯度的问题,本文提出一种耦合保角映射法与LPTN解析绕组等效导热系数的瞬态温升计算方法。【方法】首先,以一台10 kW表贴式永磁同步电机为研究对象,利用保角映射法将铜导体的圆弧形等温边界变换为直线边界,从而将绕组内部复杂的非均匀热场映射为平板热场,解析求解绕组的等效导热系数。然后,基于得到的绕组等效传热阻构建等效热网络模型,并考虑绕组电阻率随温度变化的影响迭代更新铜耗。最后,通过有限元分析(FEA)与温升试验对比,验证了解析模型的可靠性。【结果】仿真和试验结果表明,绕组温升的LPTN与FEA的误差为1.94%,证明了热网络模型在预测绕组热特性方面具有较高的计算精度。机壳

基金项目: 辽宁省优秀人才基金(LJQ2015082)

Liaoning Provincial Outstanding Talent Fund (LJQ2015082)

温升的 LPTN 与 FEA 及试验的误差分别为 3.20% 和 6.56%,进一步验证了所提模型的有效性。【结论】本文提出的基于保角映射法的绕组均匀化等效建模方法,在保证计算效率的同时能有效反映绕组的热特性,可推广至其他电机的热分析。此外,针对定子内外径比影响电机瞬态温升的分析表明,通过合理调配铜耗与铁耗的占比,可有效抑制电机的瞬态温升。

关键词: 热网络法;保角映射法;瞬态温升;表贴式永磁同步电机

0 引言

工业机器人用永磁伺服电机受体积与功率密度约束,温升过高会加速绝缘老化甚至引发绝缘失效^[1-2]。因此,准确计算永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)温升并分析其影响因素,对保障电机的可靠运行具有重要意义^[3]。

目前电机热分析方法主要包括有限体积法^[4-5]、有限元法(Finite Element Method, FEM)^[6-8]和热网络法(Lumped-Parameter Thermal Network, LPTN)^[9-11]。FEM 能够分析复杂温度场,但计算资源消耗大。现有研究考虑损耗、磁性能及散热系数对温度的敏感性,采用多物理场迭代的方法提高了电机的温升预测精度^[12-14]。FEM 与计算流体力学相结合对电机在风冷条件下的温度分布进行仿真分析,对水冷冷却结构进行优化分析,通过试验对仿真结果进行校核^[15-16]。LPTN 难以定位过热点,但可快速求解节点温度。文献[17]用 LPTN 与强跟踪扩展卡尔曼滤波在线估计永磁体温度。文献[18]将热网络拓扑与神经网络结合,实现瞬态温度场短时预测。文献[19]在建立多参数电磁热迭代模型的基础上,引入了精细热网络直接降阶的方法。针对特种电机及复杂结构导致的热分析问题,通过构建精细化的热网络模型,并结合电磁热双向迭代动态修正热参数,实现了多种冷却工况下电机温升特性的快速、准确预测^[20-21]。

电机温度场分析关键在于构建合理的等效热模型,尤其是导线排列随机且传热路径复杂的定子槽区域。早期研究将槽内分散导线等效为槽中间固体,然后在外层填充绝缘材料。文献[22]将绕组等效为串联热阻,但该方法与实际传热路径

偏差较大。为提升建模精度,文献[23-24]依据等热流原则建立改进的等效热模型,并验证其有效性。

本文提出一种基于保角映射法与 LPTN 的瞬态温升解析计算方法。该解析方法将实际绕组模型等效为均匀化绕组模型,可推广至其他电机进行热分析。首先,根据样机结构参数,建立表贴式永磁同步电机(Surface-mounted PMSM, SPMSM)热网络模型,利用保角映射法解析绕组复杂热场,获取绕组等效导热系数。然后,基于计算得到的绕组等效传热阻构建热网络模型,并求解电机瞬态温度分布。最后,通过有限元仿真及试验数据对比,验证了模型的有效性。在此基础上,分析定子内外径比对电机瞬态温升的影响规律,为电机结构优化提供理论支撑。

1 电机结构和参数

本文以一台 10 kW、短时工作制(30 min)的 SPMSM 为研究对象,其截面图如图 1 所示,基本参数如表 1 所示。

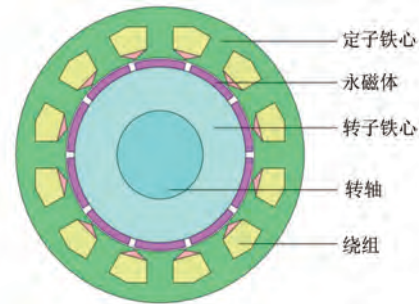


图 1 SPMSM 截面图

Fig. 1 Cross-sectional view of the SPMSM

表 1 电机的基本参数

Tab. 1 Basic parameters of the motor

参数名称	参数值	参数名称	参数值
额定功率/kW	10	定子外径/mm	165
额定电压/V	380	定子内径/mm	108
额定电流/A	22	铁心长度/mm	200
转速/(r·min ⁻¹)	3 000	极对数	5

2 热网络模型建立

2.1 等效热网络模型

本文采用等效 LPTN 对 SPMSM 进行热计算。

根据电机结构特征和传热路径,选取部件中心作为温度节点,并通过热阻连接各节点^[25],建立等效热网络模型如图 2 所示,假设如下。

- (1) 电机表面冷却条件一致,且温度分布沿径向对称;
- (2) 忽略电机内部辐射散热;
- (3) 不考虑绕组集肤效应与邻近效应。

热网络模型共划分成 52 个节点。1~7 为机壳温度节点;8~12 为定子轭部温度节点;13~19 为绕组温度节点;20~24 为定子齿部温度节点;25~29 为永磁体温度节点;30~34 为转子温度节点;35~44 为转轴温度节点;45、46 为机腔空气温度节点;47~50 为端盖温度节点;51、52 为轴承温度节点。

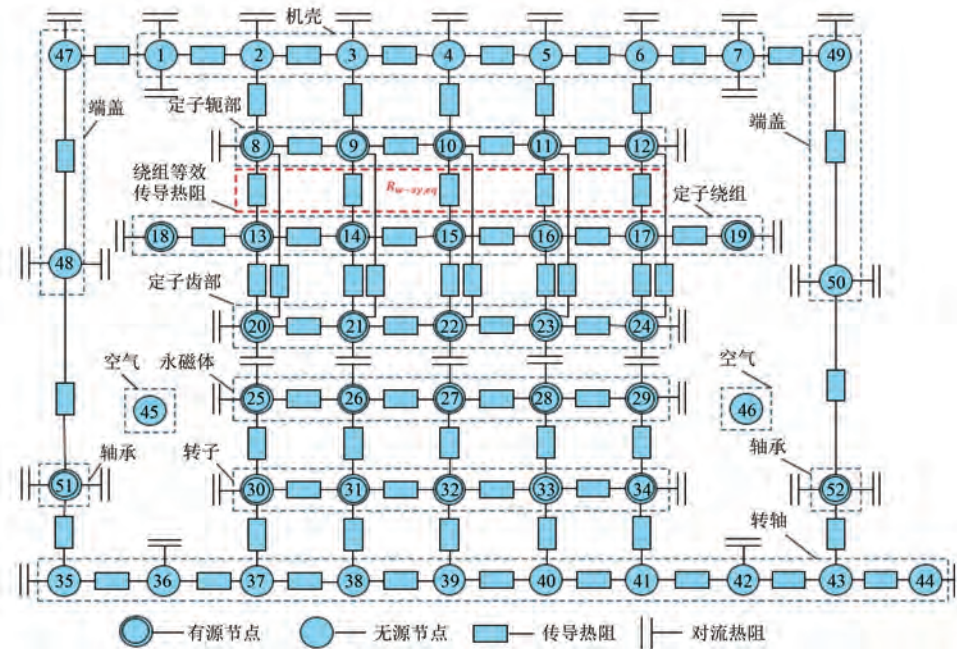


图 2 SPMSM 等效热网络模型

Fig. 2 Equivalent thermal network model of the SPMSM

2.2 绕组等效传热热阻

绕组由铜导线、浸渍漆及导线绝缘构成,采用传统 LPTN 难以解析导线绝缘与浸渍漆之间的温度梯度。因此,对图 3(a) 所示实际绕组区域进行均匀化处理,将其等效为图 3(b) 所示的连续均匀介质绕组来替代铜导线、导线绝缘和浸渍漆。

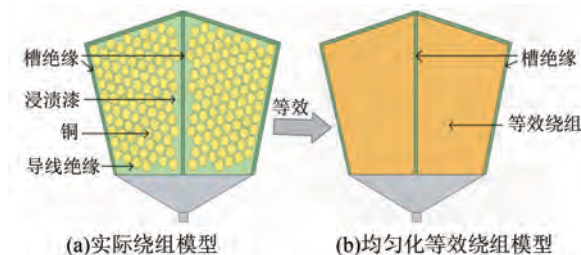


图 3 电机绕组模型

Fig. 3 Electric machine winding models

2.2.1 导线简化

导线排列的错位和随机性对绕组等效导热系

数的影响可以忽略不计^[26]。假设导线在浸渍漆中以理想菱形排列,如图 4 放大图所示,导线内部温度分布均匀,其边界是等温面,只考虑浸渍漆内的温度梯度^[27]。

为降低解析建模难度,先忽略导线绝缘,绕组等效为铜导线与浸渍漆两种介质,推导绕组等效导热系数 λ_e 。然后,将导线绝缘层传热热阻引入解析模型,对 λ_e 进行修正,得到计及导线绝缘的绕组等效导热系数 λ_{eq} 。

图 4 中菱形周期性单元模型的热流方向如图 5 所示,相邻导体间微观热流由红色细箭头流表示,粗箭头方向代表宏观有效热流方向。在菱形周期性单元内,根据傅里叶导热定理,绕组等效导热系数 λ_e 可写为

$$\lambda_e = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{Q}{(t_m - t_n)} \quad (1)$$

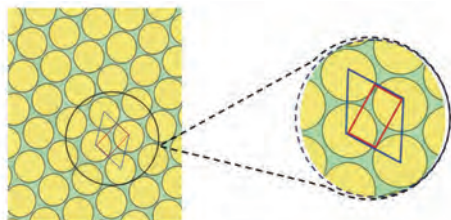


图4 菱形周期性单元模型

Fig. 4 Diamond-shaped periodic unit model

式中: Q 为导体之间的热量; t_m 、 t_n 分别为等温导体 m 、 n 的温度。

裸铜线半径为 r_s , 相邻导体中心距为 $2a$, 导体到中心距离 a 的计算表达式为

$$a = \frac{r_s}{\sqrt{\gamma_s}} \sqrt{\frac{\pi}{2\sqrt{3}}} \quad (2)$$

式中: γ_s 为槽内裸铜导线的总截面积和槽有效面积之比。

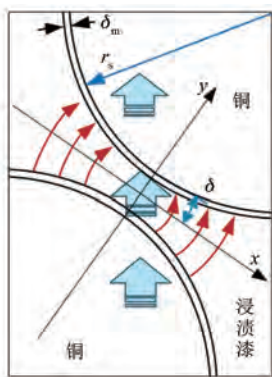


图5 菱形周期性单元子域

Fig. 5 Diamond-shaped periodic unit subdomain

2.2.2 保角映射法求解绕组等效导热系数

铜导体的弧形等温边界使浸渍漆内温度场分布不均匀,导致相邻铜导体间的温差难以准确解析求解。为在弧形边界条件下获得温度场解析解,本文采用保角映射法。该方法利用复变函数将半圆弧形铜导体等温边界映射为直线边界,从而将弧形边界下难以解析的传热问题转化为易于求解的直线边界问题,便于解析计算两铜导体之间的温差^[28]。

为便于后续保角映射中实现圆弧到直线的边界变换,沿导体热流方向对菱形周期性单元进行对称扩展,使其转化为半圆等温边界的求解域,如图6所示。

设 P 为 Z 平面解域内的任意点,点 P 在 Z 平

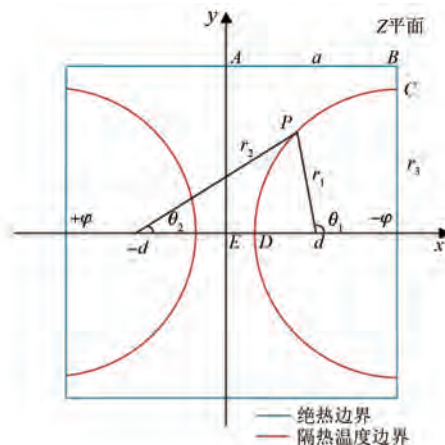


图6 Z平面内的解域

Fig. 6 Solution domain in Z plane

面上的表达式为

$$z = x + jy \quad (3)$$

当映射到 W 平面时,式(3)可以表示为

$$W(z) = u(x, y) + jv(x, y) \quad (4)$$

考虑到对数函数可以将圆映射为直线,取复函数如式(5)所示:

$$w = \ln \frac{z + d}{z - d} \quad (5)$$

式中: d 为 x 轴上关于中心点 E 对称的两点间距离的一半。

P 到两点的距离分别为 r_1 和 r_2 , P 和两点之间的角度为 θ_1 和 θ_2 。为简化解决方案需选择合适距离 d 。将式(3)、(5)代入式(4)中,可得:

$$u + jv = \ln \left| \frac{z + d}{z - d} \right| + j \arg \frac{z + d}{z - d} = \ln \frac{r_2}{r_1} + j(\theta_2 - \theta_1) \quad (6)$$

当 P 位于线段 AE 上时,整个线段上有 $r_1 = r_2$, 则 $u = 0$, 因此线段 AE 映射为 W 平面与 v 轴重合的线段。若 CD 映射为平行于 v 轴的线段, 则 AE 和 CD 之间的温差可简化为平行板传热模型的解, 可得:

$$u = \ln \frac{r_2}{r_1} = M \quad (7)$$

式中: M 为常数。

式(7)经变形后可得:

$$\frac{r_2^2}{r_1^2} = \frac{(x + d)^2 + y^2}{(x - d)^2 + y^2} = K^2 \quad (8)$$

式中: K 为常数。

当 K 大于 1 时, Z 平面上的圆方程为

$$\left(x - \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1}d\right)^2 + y^2 = \left(\frac{2Kd}{K^2 - 1}\right)^2 \quad (9)$$

可以看出, W 平面中平行于 ν 轴的线对应于 Z 平面一个圆, $K > 1$ 时对应正 x 轴上的圆, $K < 1$ 时对应负 x 轴上的一个圆。

将圆方程上中心坐标 $(l, 0)$ 和半径 r_s 代入式 (9), 可确定 d 及映射函数, 如式 (10) 所示:

$$d = \sqrt{a^2 - r_s^2} \quad (10)$$

同理, Z 平面内的其他边通过相同变换映射至 W 平面, W 平面中解域如图 7 所示。 Z 平面上的五个点 $A-E$ 对应于 W 平面上的 5 个点 $A'-E'$ 。 $A'-B'$ 是圆弧段; $B'-C'$ 可以近似为平行于 u 轴的线段; $C'-D'$ 是平行于 ν 轴的线段; $D'-E'$ 是平行于 u 轴的直线; $E'-A'$ 是 ν 轴上的线段。

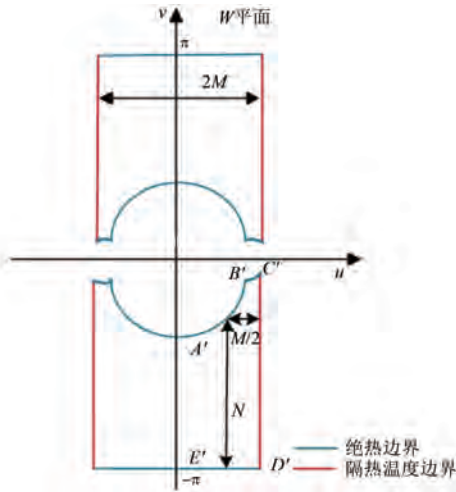


图 7 W 平面内的解域

Fig. 7 Solution domain in W plane

在 W 平面内, 平板之间的传热距离为 $2M$, 平板的有效传热面积为 N 。 N 为解域宽度, 其值等于平板的距离的一半, 可得:

$$M = \frac{1}{2} \ln \frac{a+d}{a-d} \quad (11)$$

$$N = \nu + \pi = \arctan \frac{a}{d+x} + \arctan \frac{a}{d-x} \quad (12)$$

在 $A'-B'$ 圆弧段, u 为 $M/2$ 时, x 的表达式为

$$x = \frac{d(e^M + 1)}{e^M - 1} - \frac{\sqrt{d^2(e^M + 1)^2 - (e^M - 1)^2(d^2 + l^2)}}{e^M - 1} \quad (13)$$

将式 (13) 代入式 (12) 中, 可得扩展域有效宽度 N 。 根据平行板热传导模型, 设浸渍漆导热系数为 λ_{im} , 扩展域内温差可表示为

$$t'_m - t'_n = \frac{Q'M}{\lambda_{im}N} \quad (14)$$

式中: t'_m, t'_n 分别为扩展域等温导体 m, n 温度; Q' 为扩展域的热量。

由于该扩展映射域是沿热流方向构造的对称域, 原映射域和扩展映射域物理量比例关系满足:

$$Q' = 2Q, t'_m - t'_n = t_m - t_n \quad (15)$$

因此, 原映射域可得关系式:

$$\frac{Q}{t_m - t_n} = \lambda_{im} \frac{N}{2M} \quad (16)$$

将式 (16) 代入式 (1) 中, 可得绕组等效导热系数为

$$\lambda_e = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{N}{M} \lambda_{im} \quad (17)$$

将式 (17) 代入式 (11)、(12) 中, 可得:

$$\lambda_e = \sqrt{3} \lambda_{im} \frac{\left(\arctan \frac{a}{d+x} + \arctan \frac{a}{d-x} \right)}{\ln \frac{a+d}{a-d}} \quad (18)$$

2.2.3 计及导线绝缘的绕组等效导热系数

前两节推导中, 绕组等效为铜与浸渍漆两种介质。 该简化未考虑导线绝缘层的传热热阻, 从而低估了导体表面至浸渍漆之间的界面温差, 进而导致绕组等效导热系数偏大。 因此, 本节将导线绝缘层计入等效传热路径, 并修正其对绕组等效导热系数的影响。

假设热流在绝缘层内沿径向传递, 如图 5 所示, 漆包线外径为 r' , 导线绝缘导热系数为 λ_{ins} 。 基于圆柱体热传导模型, 导线绝缘热阻 R_{ins} 的计算式为

$$R_{ins} = \frac{\ln(r'/r_s)}{2\pi\lambda_{ins}} \quad (19)$$

等效后铜导线半径 r_c 的表达式为

$$r_c = \frac{r'}{\left(\frac{r'}{r_s}\right)^{\frac{\lambda_{im}}{\lambda_{ins}}}} \quad (20)$$

此时, 确定 d_c 及映射函数为

$$d_c = \sqrt{a^2 - r_c^2} \quad (21)$$

修正后的绕组等效导热系数 λ_{eq} 的表达式为

$$\lambda_{eq} = \sqrt{3} \lambda_{im} \frac{\left(\arctan \frac{a}{d_c + x} + \arctan \frac{a}{d_c - x} \right)}{\ln \frac{a + d_c}{a - d_c}} \quad (22)$$

绕组等效传热阻 R_{weq} 的表达式为

$$R_{weq} = \frac{h \ln \frac{a + d_c}{a - d_c}}{\sqrt{3} \lambda_{im} A_c \left(\arctan \frac{a}{d_c + x} + \arctan \frac{a}{d_c - x} \right)} \quad (23)$$

式中: h 为槽高度的一半; A_c 为绕组导热面积。

2.3 散热系数的确定

电机采用自然冷却,散热系数用经验公式计算^[29]。确定电机不同部件表面的对流散热系数,如表 2 所示。

表 2 电机不同部件表面的对流散热系数

Tab. 2 Convective heat transfer coefficients on the surfaces of different motor components

参数名称	对流散热系数/($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)
机壳表面	5.36
定子齿部表面	34.21
端部绕组表面	35.95
气隙接触表面	58.30
转子铁心表面	70.74

3 温升计算及试验验证

3.1 电机热源确定

通过 FEM 计算得到 SPMSM 的主要部件损耗值,如表 3 所示。

表 3 电机各部件损耗

Tab. 3 Loss of each component of the motor

参数名称	损耗/W	参数名称	损耗/W
定子齿	158.70	永磁体	46.84
定子轭	95.10	转子铁心	0.96
绕组	86.38	轴承	10.85

3.2 等效 LPTN 温升计算结果

本文基于 Matlab/Simulink 平台,搭建电机瞬态温升计算模型。结合前文确定的散热系数与各部件损耗值,基于保角映射法解析得到的绕组等

效传热阻构建等效热网络模型,并求解电机瞬态温度分布。

定子绕组铜耗迭代流程如图 8 所示。首先预估绕组温度 T_0 ,计算初始铜耗 P_0 ,并作为热源注入热网络计算温度 T_1 ;然后对比计算温度与预估温度,若不满足收敛条件,则更新绕组电阻率重新计算损耗 P_1 。迭代至连续两次计算温度误差小于 5%,停止计算。

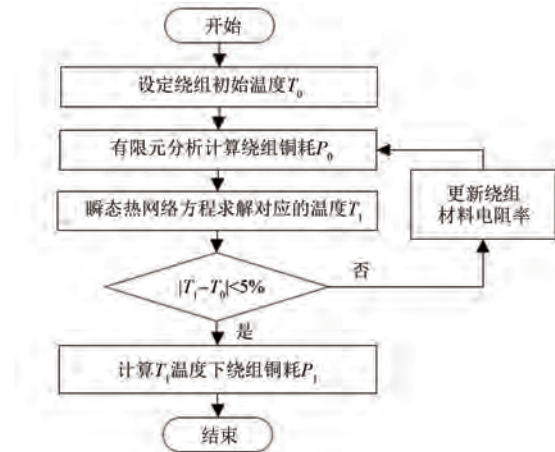


图 8 定子绕组铜耗迭代流程

Fig. 8 Iterative process for stator winding copper losses

电机各部件温度曲线如图 9 所示。由图 9 可知,电机最高温度位于绕组,为 75.48 °C。其次,定子铁心最高温度位于定子齿部,这是因为绕组产生的热量主要由齿部传导扩散。机壳温度为 67.10 °C,这是由于机壳外部与自然流动的空气接触,热交换能力较好。永磁体与转子主要依靠转子旋转产生的空气对流散热,因此转子和永磁体温度较低。

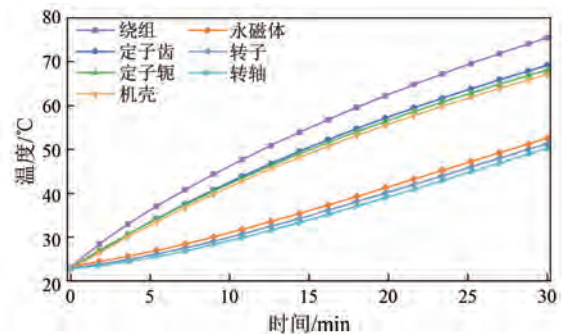


图 9 电机各部件温度曲线

Fig. 9 The temperature curves of various motor components

3.3 FEM 温升计算结果

在 Fluent 中完成材料属性定义与边界条件设置后,对 SPMSM 模型进行了有限元分析,其瞬态温度分布截面如图 10 所示。

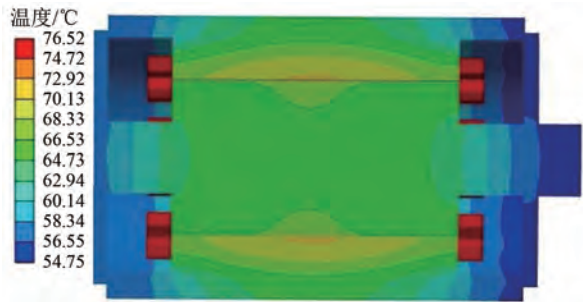


图 10 电机轴向温度分布图

Fig. 10 Motor axial temperature distribution

由图 10 可知,电机最高温度位于定子绕组,为 76.52 ℃,其具体位置在绕组轴向的中间区域。定子齿部和轭部的最高温度分别为 70.00 ℃ 和 69.08 ℃,转子铁心最高温度为 52.75 ℃。

样机各部件温升的等效 LPTN 与 FEM 计算结果对比如表 4 所示。由表 4 可知,机壳温升在 LPTN 与 FEM 下的误差为 3.20%,该误差主要源于两种建模方式的差异:FEM 基于连续介质模型,可以表征机壳内部连续的空间温度分布特性;而 LPTN 采用离散节点集中参数模型,以节点平均温度表征温度场的变化规律。尽管存在一定误差,但热网络模型整体误差在合理范围内,能够较准确反映电机关键部件的温升规律。

表 4 电机主要部件温升计算结果对比

Tab. 4 Comparison of temperature rise calculation results for the main motor components

参数名称	LPTN 温升/K	FEM 温升/K	误差/%
定子轭部	45.11	46.08	2.11
定子绕组	52.48	53.52	1.94
定子齿部	46.15	47.00	1.81
永磁体	29.57	31.27	5.45
转子轭部	28.31	29.75	4.84
机壳	44.10	45.54	3.20

通过对比热网络模型与有限元仿真结果可知,绕组温升的误差仅为 1.94%。该误差的产生是由于 LPTN 对槽内绕组进行了均匀化等效,忽略了样机中导线随机排布、浸渍状态的影响,且端部绕组形态更为复杂,导致实际样机散热路

径更复杂。因此,热网络计算值略低于有限元仿真值,但二者的温升误差较小,证明构建的热网络模型在预测绕组温升方面具有较高的计算精度。

3.4 电机温升试验

样机如图 11 所示,温升试验平台如图 12 所示。环境温度 23 ℃ 下,对 SPMSM 进行温升试验^[30]。由于电机已制作完成,限于电机结构,无法在电机内部安装温度传感器,故直接监测机壳的瞬态温度变化。

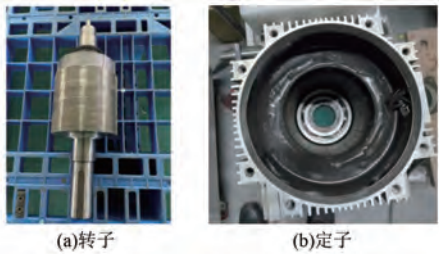


图 11 样机

Fig. 11 Prototype of the motor

机壳的等效 LPTN、FEM 与试验测得值的温度变化曲线如图 13 所示。由图 13 可知,三者的温度变化趋势具有高度一致性。在运行 30 min 时,试验值测得最高温度为 70.20 ℃。

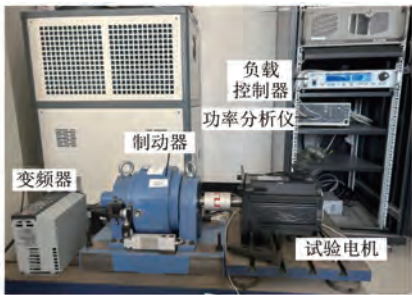


图 12 温升试验平台

Fig. 12 Experimental platform for temperature rise

机壳等效 LPTN 计算结果与试验结果对比如表 5 所示。由表 5 可知,LPTN 的计算值与试验值误差为 6.56%,两者之间的误差主要是因为对流换热系数的简化处理和热网络节点数量的限制。一方面,LPTN 中基于经验公式确定的机壳表面散热系数,难以准确计算样机表面随温升变化的非线性散热边界条件;另一方面,热网络节点反映的是区域的平均温度,而试验测量值则反映了测点位置的局部实时温度。计算结果和试验值的误差在允许范围内,表明热网络模型在温升预测中

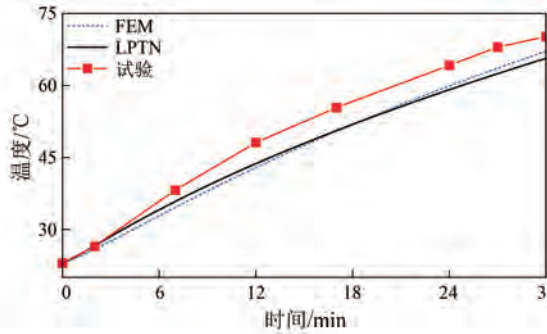


图 13 机壳温度试验与计算值对比

Fig. 13 Comparison of experimental and calculated frame temperatures

的有效性。

表 5 机壳等效 LPTN 计算结果与试验结果对比

Tab. 5 Temperature comparison on the frame between the calculated and the experimental result

参数名称	LPTN 温升/K	试验温升/K	误差/%
机壳	44.10	47.20	6.56

4 定子内外径比对电机瞬态温升的影响

在电机外径一定的条件下,定子内外径比变化会影响绕组与铁心面积,进而改变铜耗与铁耗的大小及其分配关系。同时,定子内外径比的变化还会改变绕组至铁心的传热路径长度,进而影响电机的瞬态热响应特性。由于铜耗与铁耗的分配关系不仅影响着电机的效率,而且决定着电机的温升水平。因此,有必要研究定子内外径比对电机瞬态温升的影响,探究铜耗和铁耗最佳分配关系,降低电机瞬态温升。

电机损耗随定子内外径比的变化曲线如图 14 所示。随定子内外径比减小,定子铁心损耗和总损耗均呈线性下降趋势,永磁体损耗也呈现出减小的趋势。这是因为定子内径减小使得定子齿面积增加、永磁体面积减小。铜耗呈现出先减小后增加的趋势,这是由于定子内径减小使得定子槽面积增加,从而槽内导体数增加,并调节绕组电流,以维持电磁转矩不变。

电机效率随定子内外径比的变化曲线如图 15 所示。由图 15 可知,随着定子内外径比的减小,电机效率呈现逐渐上升的趋势。

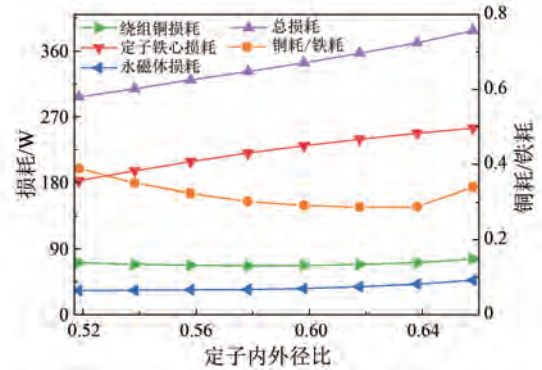


图 14 损耗与铜耗/铁耗的变化曲线

Fig. 14 Variation curves of losses and copper loss/iron loss

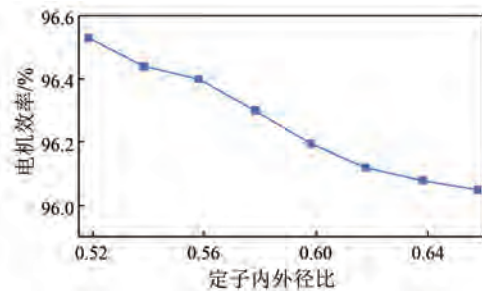


图 15 电机效率随定子内外径比的变化曲线

Fig. 15 Motor efficiency variation curve with stator inner to outer diameter ratio

绕组和永磁体最高温升随定子内外径比的变化曲线如图 16 所示。由图 16 可知,随定子内外径比减小,绕组温升初始呈现显著下降趋势。铜耗与铁耗之比为 0.35 时,绕组温升最低。这是由于此时铜耗和铁耗的分配比例,使得绕组与铁心的热效应达到了临界平衡。随定子内外径比进一步减小,绕组温升呈上升趋势。这是因为铜耗继续增加,绕组电流密度增大,使得绕组温升升高。

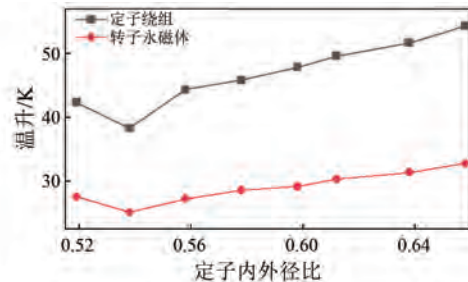


图 16 温升随定子内外径比的变化曲线

Fig. 16 Temperature rise variation curves with stator inner to outer diameter ratio

5 结语

本文提出了一种基于保角映射法与 LPTN 的 SPMSM 瞬态温升解析计算方法,通过仿真和试验验证了有效性与可靠性,得到以下结论。

(1) 本文提出的温升解析模型考虑了绕组导体之间浸渍漆与导线绝缘的影响,能有效降低计算值与试验值之间的误差。

(2) 基于保角映射法的等效导热系数解析方法,能够将实际绕组模型等效为均匀化绕组模型,从而显著提升绕组整体温升的预测精度。尽管均匀化等效建模在预测绕组局部最热点方面存在局限,且目前主要针对圆形导体排布,但其通过解析映射简化复杂导热边界的建模思路,可应用于其他电机的精细化热建模中。在将该方法推广至其他电机的热分析时,应针对电机特定的导体形状、冷却方式及损耗分布特征,对等效导热系数进行校准;同时,需根据绕组槽满率重新计算映射域边界长度,以确保模型的解析精度。

(3) 随着定子内外径比的减小,合理分配铜耗和铁耗的比例,可以有效降低绕组瞬态温升。

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

李晓静进行了方案设计、内容总结与论文撰写,李晓静、王凯东、郭宇鑫和张广春进行了仿真与试验研究,赵国新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, content summary and paper writing were carried out by Li Xiaojing. The simulation and experiment were conducted by Li Xiaojing, Wang Kaidong, Guo Yuxin and Zhang Guangchun. The manuscript was reviewed and revised by Zhao Guoxin. All authors have read and approved the final version of the paper for submission.

参考文献

[1] Liang D W, Zhu Z Q, Shao B, et al. Tracking of

winding and magnet hotspots in SPMSMs based on synergized lumped-parameter and sub-domain thermal models [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2022, 37(3): 2147-2161.

[2] 王宇婷, 蓝益鹏. 混合励磁磁通切换直线磁悬浮电动机的温升特性分析[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(12): 60-66+73.

Wang Y T, Lan Y P. Analysis of temperature rise characteristics of hybrid excitation flux switching linear magnetic suspension motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2022, 49(12): 60-66+73.

[3] Tovar-Barranco A, López-de-Heredia A, Villar I, et al. Modeling of end-space convection heat-transfer for internal and external rotor PMSMs with fractional-slot concentrated windings [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(3): 1928-1937.

[4] 贾振宇, 曲兵妮, 宋建成, 等. 紧凑型高压异步电机三维流体场分析及温度场仿真计算[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(6): 77-82.

Jia Z Y, Qu B N, Song J C, et al. Three-dimensional flow field analysis and temperature field simulation calculation of compact high-voltage asynchronous motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2021, 48(6): 77-82.

[5] 邓彬, 周杏军, 王长江, 等. 某内潜水式永磁电机三维流场与温度场仿真分析与优化[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(4): 60-65.

Deng B, Zhou X J, Wang C J, et al. Simulation analysis and optimization of three-dimensional flow and temperature fields of an internal submersible permanent magnet motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2022, 49(4): 60-65.

[6] Shi Y W, Wang J B, Wang B. Electromagnetic-thermal coupled simulation under various fault conditions of a triple redundant 9-phase PMASynRM [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 56(1): 128-137.

[7] 张培一, 安辉, 胡玉勇, 等. 真空干泵用磁通切换永磁同步电机温度场仿真分析[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(6): 59-65.

Zhang P Y, An H, Hu Y Y, et al. Temperature field simulation analysis of flux switching permanent magnet synchronous motor for vacuum dry pump [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(6): 59-65.

- [8] 李进才,李涵琪,张卓然,等. 航空油冷三级式无刷发电机流固耦合传热研究及散热优化[J]. 电工技术学报, 2024, 39(22): 7030-7044.
Li J C, Li H Q, Zhang Z R, et al. Research on fluid-solid coupling heat transfer and optimization of heat dissipation in the aircraft oil-cooled wound rotor synchronous generator [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39 (22): 7030-7044.
- [9] 李广阔,冯桂宏,张炳义. 基于磁热耦合法的提花喷气织机直驱永磁电机设计[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(1): 88-95.
Li G K, Feng G H, Zhang B Y. Design of jacquard air jet loom direct-drive permanent magnet motor based on magneto-thermal coupling method [J]. Electric Machines & Control Application, 2022, 49 (1): 88-95.
- [10] 徐金全,林华鹏,郭宏. 航空电推进电机多层波浪形拓扑及散热设计方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2024, 50(6): 1806-1818.
Xu J Q, Lin H P, Guo H. Multi-layer wave-shaped topology and thermal design method for aero-electric propulsion motors [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2024, 50 (6): 1806-1818.
- [11] Guo Y J, Xu R H, Jin P. A real-time temperature rise prediction method for PM motor varying working conditions based on the reduced thermal model [J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2023, 47(1): 103098.
- [12] 穆海琦,周舒昊,于添昊,等. 真空泵用屏蔽式永磁同步电机电磁场-温度场互相迭代计算方法[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(2): 113-122.
Mu H Q, Zhou S H, Yu T H, et al. Electromagnetic field-temperature field iterative calculation method of canned permanent magnet synchronous motor for vacuum pump [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(2): 113-122.
- [13] 王玉彬,林洋. 基于电磁热双向耦合的内置式永磁同步电机温度场等效模型及温度场分析[J]. 电工技术学报, 2025, 40(22): 7127-7139.
Wang Y B, Lin Y. Equivalent model of temperature field and temperature field analysis of interior permanent magnet synchronous motor based on electromagnetic-thermal bidirectional coupling [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(22): 7127-7139.
- [14] 张超,司马秉奇,王凯东,等. 高速永磁电机的三维集总参数热网络模型研究[J]. 电工技术学报, 2025, 40(22): 7193-7203.
Zhang C, Sima B Q, Wang K D, et al. Research of the three-dimensional lumped parameter thermal network model for high-speed permanent magnet motor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(22): 7193-7203.
- [15] Liu F, Wang X H, Xing Z Z. Design of a 35 kW permanent magnet synchronous motor for electric vehicle equipped with non-uniform air gap rotor [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2023, 59(1): 1184-1198.
- [16] Liu F, Wang X H. Design and multi-objective optimization of dual-circulation cooling system considering electro-thermal coupling for IPMSM [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2023, 9(2): 3072-3084.
- [17] 师蔚,骆凯传,张舟云. 基于热网络法的永磁电机温度在线估计[J]. 电工技术学报, 2023, 38(10): 2686-2697.
Shi W, Luo K C, Zhang Z Y. On-line temperature estimation of permanent magnet motor based on lumped parameter thermal network method [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(10): 2686-2697.
- [18] Lyu P, Shang Z H, Wang N, et al. Temperature prediction method of permanent magnet motor based on GNN-LSTM and lumped parameter thermal network [J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2024, 21(1): 633-645.
- [19] 郭玉敬,刘溪芑,金平,等. 3D精细热网络直接降阶的永磁电机实时温升预测模型研究[J]. 电机与控制学报, 2025, 29(2): 55-64.
Guo Y J, Liu X P, Jin P, et al. Research on real-time temperature rise prediction model of PM motors based on 3D detailed thermal network direct order-reduction [J]. Electric Machines and Control, 2025, 29(2): 55-64.
- [20] 冯云南,吴丽泽,李焱鑫,等. 复合圆筒型永磁直线作动器热网络模型与热性能研究[J]. 电工技术学报, 2025, 40(18): 5854-5865.
Feng Y N, Wu L Z, Li Y X, et al. Research on thermal network model and thermal performance of compound tubular permanent magnet linear actuator

- [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(18): 5854-5865.
- [21] 张健, 朱锡庆, 张卓然, 等. 电励磁双凸极无刷直流发电机热网络建模与热特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(1): 318-329.
- Zhang J, Zhu X Q, Zhang Z R, et al. Thermal network modeling and thermal characteristics analysis of doubly salient brushless DC generator with stator field winding [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(1): 318-329.
- [22] 吴胜男, 郝大全, 佟文明, 等. 基于集中参数热模型的大功率模块化定子混合励磁同步电机热分析[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(24): 7851-7859.
- Wu S N, Hao D Q, Tong W M, et al. Thermal analysis of large hybrid excitation synchronous machine with modular stator and consequent pole rotor based on lumped parameter thermal network [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(24): 7851-7859.
- [23] Yuan Y, Li B, Zhang Z Y, et al. Calculation of equivalent thermal conductivity of motor winding based on conductor distribution [J]. Journal of Thermal Science and Engineering Applications, 2024, 16(5): 051009.
- [24] Li Z Z, Xu Z Y, Zhang F Y, et al. Analytical calculation and experimental validation of Litz wires axial thermal conductivity [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2023, 10(1): 1167-1179.
- [25] Zhang F Y, Gerada D, Xu Z Y, et al. Improved thermal modeling and experimental validation of oil-flooded high-performance machines with slot-channel cooling [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2021, 8(1): 312-324.
- [26] Zhang X, Dong T H, Zhou F. Equivalent thermal conductivity estimation for compact electromagnetic windings [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 66(8): 6210-6219.
- [27] Sun Z H, Wang Q J, Li G L, et al. A closed-form analytical method for reliable estimation of equivalent thermal conductivity of windings with round-profile conductors [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2020, 36(2): 1143-1155.
- [28] Tang Z P, Wang Y C, Yu F Y, et al. Estimation of equivalent thermal conductivity for electric machine windings using conformal mapping method [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2025, 11(3): 7662-7672.
- [29] 黄国治, 傅丰礼. Y2 系列三相异步电动机技术手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004: 146-147.
- Huang G Z, Fu F L. Technical manual of Y2 series three phase asynchronous motor [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2004: 146-147.
- [30] 王升平, 温万昱, 郭美华. 电动汽车用永磁同步电机散热设计与仿真试验[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(7): 74-78+92.
- Wang S P, Wen W Y, Guo M H. Heat dissipation design, simulation and test of permanent magnet synchronous motor for electric vehicle [J]. Electric Machines & Control Application 2020, 47(7): 74-78+92.

收稿日期:2026-02-14

收到修改稿日期:2026-04-27

作者简介:

李晓静(1997—),女,硕士研究生,研究方向为特种电机及其控制系统,li_xiaojing0@163.com;

* 通信作者:李晓静(1997—),女,硕士研究生,研究方向为特种电机及其控制系统,li_xiaojing0@163.com。