

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201007

交流牵引电机温度场分析绕组气隙优化建模方法

姜海鹏^{1,2}, 郭宇轩^{1,2}, 张小平^{1,2}, 张铸², 朱广辉³

(1. 湖南科技大学海洋矿产资源探采装备与安全技术国家地方联合工程实验室, 湖南 湘潭 411201;
2. 湖南科技大学信息与电气工程学院, 湖南 湘潭 411201; 3. 湘潭电机股份有限公司, 湖南 湘潭 411101)

摘要: 针对交流牵引电机定子绕组间存在不规则气隙, 而采用常规等效建模法所建模型准确性不高的问题, 提出一种绕组气隙优化建模方法。确定了电机定子绕组等效模型的基本结构, 提出了等效模型中绕组气隙最佳宽度确定方法, 即根据所确定的等效气隙模型并采用有限元法对电机进行温度场分析以得到绕组模型表面某点对应的温度值。通过获取不同气隙宽度下模型表面某点对应的温度数据并采用数值拟合方法得到两者间的函数关系, 根据所得函数关系并实测上述模型表面某点对应的实际温度, 即可得到绕组等效气隙模型相应的最佳气隙宽度。该方法有效提高了交流牵引电机定子绕组建模的准确性, 由此显著提升了其温度场分析结果的准确性, 具有较好的应用价值。

关键词: 交流牵引电机; 温度场分析; 绕组气隙; 优化建模方法

Optimization modeling method for air gap analysis of an AC traction motor temperature field

JIANG Haipeng^{1,2}, GUO Yuxuan^{1,2}, ZHANG Xiaoping^{1,2}, ZHANG Zhu², ZHU Guanghui³

(1. National-Local Joint Engineering Laboratory of Marine Mineral Resources Exploration Equipment and Safety Technology, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 2. College of Information and Electrical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;
3. Xiangtan Electric Manufacturing Group Corporation Ltd., Xiangtan 411101, China)

Abstract: A winding air gap optimization modeling method is proposed to address the problem of irregular air gaps between the stator windings of an AC traction motor and the inaccuracy of the model built by conventional equivalent modeling methods. In this paper, the basic structure of the stator winding equivalent model is determined, and the optimal width of the winding air gap in the equivalent model is proposed, i.e., according to the equivalent air gap model and using the finite element method to analyze the temperature field of the motor to obtain the temperature value corresponding to a certain point on the winding model surface. The best air gap width corresponding to the equivalent air gap model can be obtained according to the functional relationship obtained and the actual temperature corresponding to a point on the surface of the model. This method effectively improves the accuracy of the stator winding modeling of an AC traction motor, thus significantly improving the accuracy of its temperature field analysis, and has good application value.

This work is supported by the Scientific Research Project of Hunan Education Department (No. 19C0791).

Key words: AC traction motor; temperature field analysis; winding air gap; optimization modeling method

0 引言

交流牵引电机具有结构简单、易维护、效率高及运行可靠等特点, 在众多领域得到了广泛应用^[1]。

然而电机运行中因内部损耗导致其发热, 如果电机发热严重, 则会对其使用寿命与运行可靠性产生严重影响。因此, 对其温度场展开分析以指导其结构的优化设计, 对于降低电机的温升具有重要意义^[2-6]。

目前, 常用的温度场分析方法主要有等效热路法、简化公式法、有限元法等^[7-13]。其中有限元法分析精度高, 且能反映出电机内部各部件的温度场

基金项目: 湖南省教育厅科学研究项目资助(19C0791); 长株潭国家自主创新示范区专项资助项目(2017XK2303)

分布情况,因而受到了广大使用者的青睐;但其分析结果受模型准确度的影响较大,尤其对于采用绕线式定子的交流牵引电机而言,由于导线间存在不规则形状的气隙,难以建立其准确的分析模型,故在实际应用中常采用等效模型来简化其结构。在现有研究中,主要提出了单一导体法^[14]、分层等效法^[15]、等宽度建模法^[16]等简化建模法,其中单一导体法与分层等效法均未考虑绕组气隙^[17]的影响,因而影响了其温度场的分析精度;而等宽度建模法虽在建模时考虑了绕组气隙的影响,但绕组气隙等效模型较为简单,因而其分析精度亦不够理想。

为此,本文结合交流牵引电机的结构特点,针对其绕组气隙提出一种优化建模方法。文中阐述了绕组不规则气隙的等效模型结构与最佳气隙宽度确定方法,并通过仿真与实验对其效果进行了验证。

1 电机损耗与边界条件

1.1 电机损耗计算方法

交流牵引电机运行时将产生多种损耗,包括铜耗、转子导条铝耗、铁耗及机械损耗,其计算方法如下。

铜耗计算公式为^[18]

$$P_{Cu} = 3I_{ms}^2 R_p \quad (1)$$

式中: I_{ms} 为定子绕组电流; R_p 为定子绕组电阻。

转子导条铝耗计算公式为^[19]

$$P_{Al} = \frac{sI_b}{\delta} \sum_{e=1}^{E_2} \Delta_e J_{ze}^2 \quad (2)$$

式中: s 为转差率; I_b 为导条长度; σ' 为电导率; E_2 、 Δ_e 和 J_{ze} 分别为转子槽内单元总数、各单元面积及各单元感应电密。

铁耗计算公式为^[20]

$$P_{Fe} = K_c (fB_m)^2 + K_h fB_m^2 + K_e (fB_m)^{1.5} \quad (3)$$

式中: K_c 为涡流损耗系数; f 为磁场频率; B_m 为磁密值; K_h 为磁滞损耗系数; K_e 为异常损耗系数。

机械损耗计算公式为^[21]

$$P_{fw} = 14.562e^{0.00144n} \quad (4)$$

式中: n 为电机转速; e 为自然对数函数的底数。

1.2 边界条件界定方法

交流牵引电机主要通过机壳表面的自然散热及定、转子间气隙的对流传热来实现散热,其边界条件为^[22]

$$\begin{cases} \lambda \frac{\partial T}{\partial m} = -q_0 \\ T = T_0 \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial m} = \alpha(T - T_e) \end{cases} \quad (5)$$

式中: q_0 为通过边界面的热流密度; T 为电机温度; m 为边界面法向量; λ 为空气导热系数; T_e 为环境温度; T_0 和 α 分别为边界面的温度和传热系数。

对于机壳表面的自然散热,其对流传热系数 α 的计算公式为^[23]

$$\alpha = 9.73 + 14v^{0.62} \quad (6)$$

式中, v 为机壳表面的风速。

而对于定、转子间气隙的对流传热,根据文献[21],其对流传热系数 α 计算方法如下。

1) 首先分别计算定、转子间气隙的雷诺数 Re 和临界雷诺数 Re_l , 公式为^[24]

$$Re = \frac{\pi d_1 \omega_g \delta}{60\gamma} \quad (7)$$

$$Re_l = 41.2 \sqrt{\frac{d_2}{\delta}} \quad (8)$$

式中: d_1 、 ω_g 分别为转子的半径与转速; δ 为定转子间气隙的宽度; γ 为空气运动粘度系数; d_2 为定子半径。

2) 再确定相应的对流传热系数 α , 具体为:

当 $Re < Re_l$ 时,对流传热系数 α 约等于空气的导热系数。在封闭状态下,空气的导热系数 λ_k 约等于 0.023 W/m k;

当 $Re > Re_l$ 时,其对流传热系数 α 的计算公式为

$$\alpha = \frac{0.06Re^{0.7} \lambda_k}{\delta} \quad (9)$$

2 交流牵引电机求解域模型的建立

在采用有限元法进行电机温度场分析时,首先需建立其求解域模型,包括数学模型与三维有限元模型,具体如下。

2.1 数学模型

根据文献[25],在直角坐标系下,交流牵引电机三维温度场分析的数学模型为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = -q_v \quad (10)$$

式中: q_v 为热源密度; λ_x 、 λ_y 、 λ_z 分别表示 x 、 y 、 z 轴方向的导热系数。

2.2 三维有限元模型

首先通过建立电机定子绕组的等效模型并确定其绕组气隙最佳宽度的求取方法, 再在此基础上建立电机的三维有限元模型, 具体如下。

2.2.1 电机定子绕组等效建模方法

为简化分析, 将定子槽内每相绕组所有导线等效为单一导体^[26], 其截面形状与定子槽型相同, 其截面则与所有导线的总截面积相等, 计算方法为

$$s_1 = n\pi r^2 \quad (11)$$

式中: s_1 为每相绕组所有导线截面积之和; n 为每相绕组的导线匝数; r 为单匝导线半径。

另外, 鉴于导线表面包裹有多种绝缘材料, 建模时为简化起见, 将其等效为单一绝缘层, 且其厚度处处相等; 同时对于各匝导线间存在的不规则气隙, 则将其等效为宽度处处相等的气隙, 且位于上述等效绝缘层与定子槽壁及槽楔间。基于上述分析, 可得电机定子绕组的等效模型如图 1 所示。图 1 中, R 为定子槽底半径, h_1 为等效绝缘层宽度, h_2 为绕组气隙宽度, h_3 为槽楔的宽度, H 为定子齿部高度。

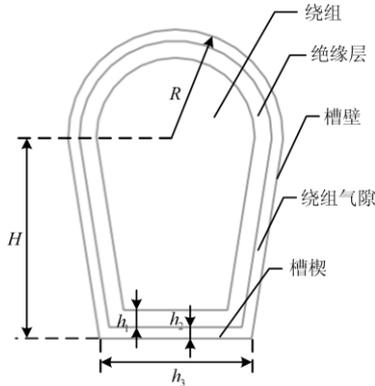


图 1 定子绕组等效模型结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of equivalent structure of stator winding

由于针对某确定的电机来说, 其每相绕组的总截面积也即其等效导体的截面积以及定子槽截面积是一定的, 因而对于图 1 所示定子绕组等效模型来说, 其等效导体与定子槽壁及槽楔间等效绝缘层与气隙的总宽度也就是一定的, 其总宽度的计算方法为

$$h = R(1 - \sqrt{\frac{s_1}{s_2}}) \quad (12)$$

式中: h 为等效绝缘层与气隙的总宽度, 即 $h = h_1 + h_2$; s_2 为定子槽截面积。

2.2.2 绕组气隙最佳宽度确定方法

如上所述, 在图 1 所示定子绕组的等效模型中,

其等效导体与定子槽壁及槽楔间等效绝缘层与气隙的总宽度 h 是一定的, 但两者各自的宽度值却难以准确确定。为此, 提出一种绕组气隙最佳宽度确定方法, 其流程图如图 2 所示, 具体步骤为: 首先确定电机定子绕组等效气隙宽度的初始值, 由该宽度值得到等效导体表面等效绝缘层的厚度值, 在此基础上通过建立电机的三维有限元模型并采用有限元法对其进行温度场分析, 得到定子绕组等效模型表面任意选取的某点温度值; 再通过改变绕组等效气隙的宽度, 采用上述相同方法得到绕组等效模型表面某点对应的温度数据, 再采用数值拟合方法对上述气隙宽度与温度数据进行拟合, 得到气隙宽度与该点温度间的函数关系, 然后实测上述模型表面某点对应的实际温度, 并将其代入上述函数, 即可得到绕组等效气隙模型的最佳气隙宽度。

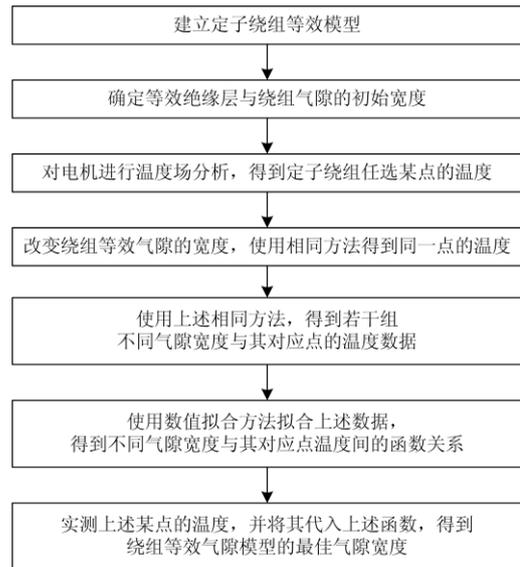


图 2 绕组气隙最佳宽度确定方法流程图

Fig. 2 Flow chart of determining the optimal width of winding air gap

根据上述方法, 可得到绕组气隙宽度与模型表面某点对应温度间的函数关系式为

$$h_2(T) = \alpha e^{bT} + ce^{dT} \quad (13)$$

式中: $h_2(T)$ 为绕组气隙宽度函数; T 为绕组等效模型表面某点的温度; a 、 b 、 c 、 d 分别为绕组气隙宽度函数的系数。

2.2.3 建立交流牵引电机三维有限元模型

由于电机结构具有对称性, 为简化分析, 在建立其三维有限元模型时, 只取定、转子各一槽, 轴向一半作为求解区域, 其三维有限元模型如图 3 所示。可见, 该模型由绕组等效导体、定转子间气隙、端环、转轴、机壳、定子铁芯、等效绝缘层、绕组

气隙、槽楔、导条以及转子铁芯等部件构成。

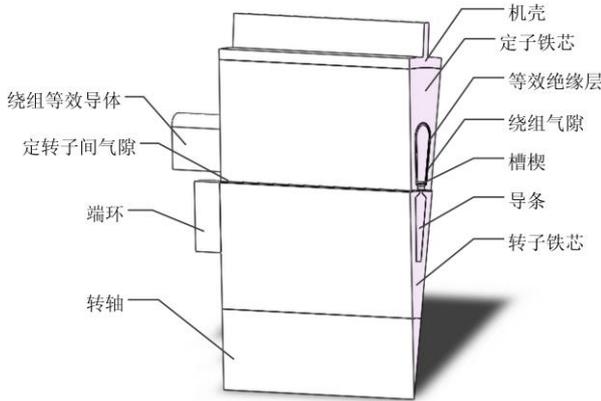


图3 交流牵引电机三维有限元模型

Fig. 3 Finite element model of AC traction motor

3 交流牵引电机温度场计算

下面以某电机为例进行相应的温度场分析，以验证本文提出的交流牵引电机定子绕组气隙优化建模方法。其中电机主要结构参数如表 1 所示。

表 1 电机主要结构参数

Table 1 Motor's main construction parameters

参数	数值	参数	数值
定子外径	155 mm	每槽线圈匝数	31
定子内径	98 mm	定子槽楔宽度	4.5 mm
转轴外径	38 mm	导线直径	1.18 mm
铁芯长度	135 mm	定转子间气隙	0.3 mm
定子槽数	36	定子槽底半径	3.3 mm
转子槽数	32	定子齿部高度	11.6 mm

根据式(12)及表 1 所示电机参数，可得定子绕组等效模型中等效绝缘层与气隙的总宽度为 0.769 mm，在该总宽度范围内任选 $h_2=0.065$ mm 作为气隙的初始宽度，并按 0.064 mm 的间隔依次取 12 组绕组气隙宽度值；针对每组气隙宽度值，通过建立电机的三维有限元模型并对其进行温度场分析，得到相应的温度场分布图，同时如以绕组端部某处为待测点，得到相应的绕组气隙宽度与绕组端部待测点的温度数据如表 2 所示。

表 2 绕组气隙宽度与待测点温度数据表

Table 2 Data sheet of winding air gap width and temperature of point to be measured

气隙宽度/mm	0.065	0.129	0.193	0.257	0.321	0.385
稳态温度/°C	78.32	79.83	81.84	84.08	87.14	90.89
气隙宽度/mm	0.449	0.513	0.577	0.641	0.705	0.769
稳态温度/°C	93.75	96.42	99.18	102.94	105.75	109.46

针对表 2 所示数据，采用数值拟合方法并按式 (13)进行数据拟合，得到式中各项系数 a 、 b 、 c 、 d 分别为：0.039 91、0.027 26、-765.1、-0.101 8。

将上述所得各项系数代入式(13)，可得绕组气隙宽度与绕组端部温度间的具体函数关系式为

$$h_2(T) = 0.03991e^{0.02726T} - 756.1e^{-0.1018T} \quad (14)$$

4 实验分析

为进一步验证本文提出的交流牵引电机绕组气隙优化建模方法的效果，研制了一套 3 kW 交流牵引电机的实验装置，如图 4 所示。其中，电机温度测量位置包括电机定子绕组端部、定子铁芯以及机壳，其测量方式为电机定子绕组端部、定子铁芯使用温度传感器检测温度，机壳温度则采用红外测温仪进行测量。

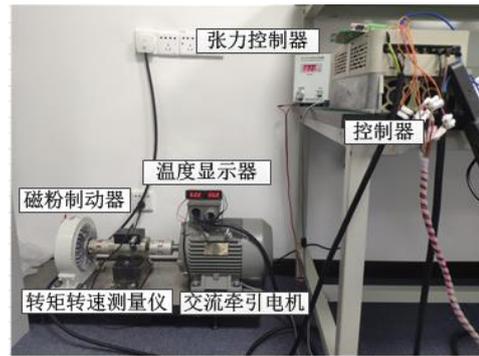


图 4 交流牵引电机温度实验平台

Fig. 4 AC traction motor temperature experiment platform

实验时，交流牵引电机以额定工况运行，待电机各部位温升稳定后，分别读取其温度值，如表 3 所示；其中机壳温度因采用红外测温仪测量，存在一定误差，故采用文献[27]中所示方法对其进行了补偿，也即表 3 中机壳温度为补偿后的温度值。

表 3 交流牵引电机主要部件实测温度值

Table 3 Measured temperature of main components of AC traction motor

部件	绕组端部	定子铁芯	机壳
稳态温度/°C	86.00	62.80	57.31

根据表 3 中所示绕组端部实测温度，并将其代入式(14)中，可得相应的绕组气隙最佳宽度值为： $h_2=0.297$ mm。

根据上述所得交流牵引电机定子绕组的最佳气隙宽度值，再采用上述相同方法对其进行温度场分析，得到其温度场分布及各主要部件稳态温度值分别如图 5 和表 4 所示。

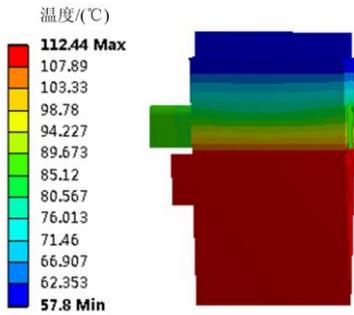


图 5 气隙优化建模法对应的电机温度场分布图

Fig. 5 Temperature field distribution of motor corresponding to air gap optimization modeling method

表 4 气隙优化建模法对应的电机主要部件稳态温度值
Table 4 Main motor parts' steady state temperature values by air gap optimization modeling method

主要部件	定子绕组	定子铁芯	机壳
稳态温度/(°C)	86.00	63.75	57.80

另外, 为便于说明本文提出的交流牵引电机绕组气隙优化建模法相对于文献[14]所提出的等宽度气隙建模法的效果, 在上述相同条件下采用等宽度气隙建模法对电机进行温度场分析, 得到相应的温度场分布及各主要部件稳态温度值分别如图 6 和表 5 所示。

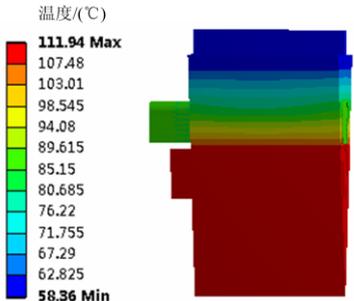


图 6 气隙等宽度建模法对应的电机温度场分布图

Fig. 6 Temperature field distribution of motor corresponding to air gap equal width modeling method

表 5 气隙等宽度建模法对应的电机各主要部件稳态温度值
Table 5 Main motor parts' steady state temperature values by air gap equal width modeling method

主要部件	绕组端部	定子铁芯	机壳
稳态温度/(°C)	84.93	65.05	58.36

根据表 3—表 5, 针对上述两种绕组气隙建模法所得电机各主要部件的稳态温度值, 分别与其实测温度进行比较, 得到相应的相对误差, 如表 6 所示。

表 6 两方法对应电机各主要部件稳态温度的相对误差

Table 6 Relative error of temperature field analysis results obtained by two methods

方法	部件	相对误差/%
绕组气隙优化建模方法	绕组端部	0.00
	定子铁芯	1.51
	机壳	0.85
绕组气隙等宽度建模方法	绕组端部	1.24
	定子铁芯	3.58
	机壳	1.83

根据表 6 可见, 本文提出的交流牵引电机绕组气隙优化建模法相对于文献[14]所提出的等宽度气隙建模法, 在交流牵引电机温度场分析中所得各主要部件的稳态温度值与其实测温度值间的相对误差下降明显, 从而说明本文所提出的绕组气隙优化建模法是可行的。

5 结论

针对交流牵引电机定子绕组间存在不规则气隙, 而采用常规等效建模法所建模型准确性不高的问题, 提出一种绕组气隙优化建模方法。文中介绍了电机定子绕组等效模型的基本结构, 研究了等效模型中绕组气隙最佳宽度确定方法, 并针对该方法与文献[14]所提出的等宽度气隙建模法, 分别通过温度场分析与实验进行了对比分析, 结果表明: 本文所提出的绕组气隙优化建模法有效提高了电机温度场分析结果的准确性, 从而证明该方法在绕组气隙建模方面具有更高的准确性。

参考文献

- [1] HAMDI H, REGAYA C B, ZAAFOURI A. A sliding-neural network control of induction-motor-pump supplied by photovoltaic generator[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(4): 306-322. DOI: 10.1186/s41601-019-0145-1.
- [2] SHAFIGHY M, KHOO S, KOUZANI A Z. Modelling and simulation of regeneration in AC traction propulsion system of electrified railway[J]. IET Electrical Systems in Transportation, 2015, 5(4): 145-155.
- [3] JURKOVIC S, RAHMAN K M, MORGANTE J C, et al. Induction machine design and analysis for general motors e-assist electrification technology[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(1): 631-639.
- [4] 佟文明, 孙静阳, 舒圣浪. 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.

- 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.
- [5] 陈美玲, 石瑶, 张云, 等. 高真空工况下开关磁阻电机温度场分析[J]. *电测与仪表*, 2020, 57(19): 45-50.
CHEN Meiling, SHI Yao, ZHANG Yun, et al. Analysis of temperature field of switched reluctance motor under high vacuum conditions[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2020, 57(19): 45-50.
- [6] 赵科, 陆东生, 卢仰泽, 等. 车载油浸式空心电抗器瞬态温度场计算和分析[J]. *高压电器*, 2020, 56(5): 69-73, 78.
ZHAO Ke, LU Dongsheng, LU Yangze, et al. Calculation and analysis of transient temperature field of vehicle-mounted oil-immersed air-core reactor[J]. *High Voltage Apparatus*, 2020, 56(5): 69-73, 78.
- [7] JANKOWSKI T A, PRENGER F C, HILL D D, et al. Development and validation of a thermal model for electric induction motors[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, 57(12): 4043-4054.
- [8] CAI X, MING C, ZHU S, et al. Thermal modeling of flux-switching permanent-magnet machines considering anisotropic conductivity and thermal contact resistance[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(6): 3355-3365.
- [9] 袁肖雷, 周羽生, 王永安, 等. 基于电磁-热耦合场的输电线路高频激励融冰分析与计算[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(3): 103-109.
YUAN Xiaolei, ZHOU Yusheng, WANG Yong'an, et al. Analysis and calculation of high-frequency excitation de-icing for transmission lines based on electromagnetic and thermal coupling field[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(3): 103-109.
- [10] 朱显辉, 武俊峰, 师楠, 等. 考虑行驶工况的电动汽车驱动电机动态温升计算[J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(7): 127-133.
ZHU Xianhui, WU Junfeng, SHI Nan, et al. Dynamic temperature rise calculation for EV drive motor regarding driving condition[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(7): 127-133.
- [11] 吴书煜, 马宏忠, 姜宁, 等. 基于多物理场耦合的高压电抗器温度场仿真与分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(4): 17-24.
WU Shuyu, MA Hongzhong, JIANG Ning, et al. Simulation and analysis of temperature field of high voltage reactor based on multi physical field coupling[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(4): 17-24.
- [12] 甘源, 白锐, 张琪. 基于场-路耦合的干式空心电抗器稳态电磁场及电动力分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(21): 144-149.
GAN Yuan, BAI Rui, ZHANG Qi. Steady-state electromagnetic field and electrodynamic analysis of dry-type air-core reactor based on field-circuit coupling[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(21): 144-149.
- [13] 朱高嘉, 朱英浩, 朱建国, 等. 基于有限公式法和流固耦合的永磁牵引电动机冷却系统设计与分析[J]. *电工技术学报*, 2017, 32(5): 70-77.
ZHU Gaojia, ZHU Yinghao, ZHU Jianguo, et al. Thermal analysis and cooling system design of a permanent magnet traction motor using computational fluid dynamics and cell method[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2017, 32(5): 70-77.
- [14] LI W, CAO J, ZHANG X. Electrothermal analysis of induction motor with compound cage rotor used for PHEV[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2010, 57(2): 660-668.
- [15] 王治军, 高忠峰, 周茜, 等. 感应电机三维温度场建模与仿真计算[J]. *船电技术*, 2014, 34(7): 30-34.
WANG Zhijun, GAO Zhongfeng, ZHOU Qian, et al. Modeling and simulation calculating of an asynchronous motor in 3D thermal field[J]. *Marine Electric & Electronic Engineering*, 2014, 34(7): 30-34.
- [16] 刘莘, 张小平, 张铸. 开关磁阻电机温度场分析中绕组气隙建模方法[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2019, 31(6): 93-97.
LIU Ping, ZHANG Xiaoping, ZHANG Zhu. Modeling method for winding air gap in temperature field analysis of switched reluctance motor[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2019, 31(6): 93-97.
- [17] 王磊磊, 张嵩阳, 姚德贵, 等. 变电站铁心电抗器振动与可听噪声研究综述[J]. *高压电器*, 2019, 55(11): 26-33.
WANG Leilei, ZHANG Songyang, YAO Degui, et al. Vibration and audible noise of iron-core reactor in substation: a review[J]. *High Voltage Apparatus*, 2019, 55(11): 26-33.
- [18] 谢颖, 王严. 笼型感应电动机三维全域温度场计算[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(36): 96-101.
XIE Ying, WANG Yan. Calculation of 3D whole domain thermal fields of squirrel-cage induction motors[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(36): 96-101.
- [19] 邵永, 刘赵淼. 感应电机全域三维瞬态温度场分析[J]. *中国电机工程学报*, 2010, 30(30): 114-120.

- TAI Yong, LIU Zhaomiao. Analysis on three-dimensional transient temperature field of induction motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(30): 114-120.
- [20] GRACE K, GALIOTO S, BODLA K, et al. Design and testing of a carbon-fiber-wrapped synchronous reluctance traction motor[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(5): 4207-4217.
- [21] 谢颖, 王泽, 单雪婷, 等. 基于多场量的笼型感应电机三维瞬态磁热固耦合计算分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(11): 3076-3084.
- XIE Ying, WANG Ze, SHAN Xueting, et al. The calculations and analysis of 3D transient magnetic-thermal-solid coupling for squirrel-cage induction motors based on multi fields[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(11): 3076-3084.
- [22] 程树康, 李翠萍, 柴凤. 不同冷却结构的微型电动车用感应电机三维稳态温度场分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(30): 82-90.
- CHENG Shukang, LI Cuiping, CHAI Feng. Analysis of the 3D steady temperature field of induction motors with different cooling structures in mini electric vehicles[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(30): 82-90.
- [23] WIDMER J D, MARTIN R, MECROW B C. Precompressed and stranded aluminum motor windings for traction motors[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(3): 2215-2223.
- [24] 刘苹, 张小平, 匡斯建, 等. 电机温度场分析中三维有限元模型网格划分方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(8): 173-178.
- LIU Ping, ZHANG Xiaoping, KUANG Sijian, et al. 3D finite element model mesh division method in motor temperature field analysis[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2019, 33(8): 173-178.
- [25] BOGLIETTI A, CAVAGNINO A, STATON D A. TEFC induction motors thermal models: a parameter sensitivity analysis[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005, 41(3): 756-763.
- [26] WROBEL R, MELLOR P H. Thermal design of high-energy-density wound components[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(9): 4096-4104.
- [27] 廖盼盼, 张佳民. 红外测温精度的影响因素及补偿方法的研究[J]. 红外技术, 2017, 39(2): 173-177.
- LIAO Panpan, ZHANG Jiamin. Research on influence factors for measuring and method of correction in infrared thermometer[J]. Infrared Technology, 2017, 39(2): 173-177.

收稿日期: 2020-08-17; 修回日期: 2020-11-04

作者简介:

姜海鹏(1978—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力电子与电力传动、电工理论与新技术等; E-mail: Haipeng01@163.com

郭宇轩(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子与电力传动; E-mail: 453877764@qq.com

张小平(1966—), 男, 通信作者, 教授, 硕士生导师, 研究方向为电力电子与电力传动、智能控制等。E-mail: zxp836@163.com

(编辑 周金梅)