

DOI: 10.13382/j.jemi.B1902699

# 开关磁阻电机绕组气隙建模及最佳气隙宽度确定方法\*

刘 苹<sup>1,2</sup> 张小平<sup>1,2</sup> 匡斯建<sup>1,2</sup> 王静袁<sup>1,2</sup> 张 铸<sup>2</sup>

(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 湘潭 411201;

2. 湖南科技大学 信息与电气工程学院 湘潭 411201)

**摘要:**针对开关磁阻电机定子槽内双绕组间因存在不规则气隙而导致其温度场分析建模困难的问题,提出一种双绕组气隙的改进建模方法。分析了电机双绕组间气隙总截面积的计算方法,研究了双绕组气隙的模型结构与最佳气隙宽度的确定方法,在此基础上建立了开关磁阻电机的三维有限元模型,并采用有限元法对其温度场进行了分析,得到开关磁阻电机的温度场分布,通过对不同气隙宽度下的温度场分析并采用数值拟合方法得到其气隙宽度与相应温度间的函数关系,利用该函数关系及相应的实测温度值,即可得到双绕组气隙模型的最佳气隙宽度,该方法因有效提高了开关磁阻电机温度场分析结果的准确性,因而具有较好的应用价值。

**关键词:** 开关磁阻电机;温度场分析;绕组气隙;建模方法

**中图分类号:** TM352 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

## Air gap modeling of SRM winding and determination of optimal air gap width

Liu Ping<sup>1,2</sup> Zhang Xiaoping<sup>1,2</sup> Kuang Sijian<sup>1,2</sup> Wang Jingyuan<sup>1,2</sup> Zhang Zhu<sup>2</sup>

(1. National-Local Joint Engineering Laboratory of Marine Mineral Resources Exploration Equipment and Safety Technology, Hunan University of Science and Technology, Hunan Xiangtan 411201, China;

2. College of Information and Electrical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the temperature field analysis modeling is difficult due to the irregular air gap between the two windings in the stator slot of the switched reluctance motor, an improved modeling method for the double winding air gap is proposed. The calculation method of the total cross-sectional area of the air gap between the two windings of the motor is analyzed. The model structure of the double-winding air gap and the method for determining the optimal air gap width are studied. Based on this, a three-dimensional finite element model of the switched reluctance motor is established. The temperature field is analyzed by finite element method, and the temperature field distribution of the switched reluctance motor is obtained. The temperature field under different air gap width is analyzed and the numerical fitting method is used to obtain the air gap width and the corresponding temperature. The function relationship, using the function relationship and the corresponding measured temperature value, can obtain the optimal air gap width of the double-winding air gap model. This method effectively improves the accuracy of the temperature field analysis results of the switched reluctance motor, it has a good application value.

**Keywords:** SRM; temperature field analysis; winding air gap; modeling method

## 0 引言

开关磁阻电机 (switched reluctance motor, SRM) 具有

控制灵活、可靠性高、起动电流小以及成本低等优点而在许多领域得到了日益广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。开关磁阻电机在运行过程中其内部因损耗而产生大量热量,这些热量一方面使电机内部温度迅速上升,另一方面则通过电机各

部件与环境间的热交换而向外扩散,并最终达到热平衡,从而使电机内部各部件的温度达到一定的稳定值;如果电机内部温度过高,则会使电机绝缘迅速老化,从而严重影响其使用寿命。因此,针对开关磁阻电机开展温度场分析,从而为实现其结构的优化设计提供依据,对于降低电机温升以确保电机的安全运行具有重要意义<sup>[3-4]</sup>。

目前,开关磁阻电机温度场分析的计算方法主要有简化公式法、等效热路法及有限元法<sup>[5-7]</sup>。其中,前两种温度场分析方法所得结果均为平均温度,无法反映电机内部是否存在局部温度过高的现象,因而效果非常有限;而有限元法却能准确反映出电机内部各单元的温度分布情况,而且分析结果准确性高,因而获得了广泛的应用;但有限元法对模型的准确性要求高,尤其对于开关磁阻电机定子槽内双绕组来说,因其多股导线间结构的不规则,给其准确建模造成了极大的困难,因而在其实际建模过程中,往往会对其有限元模型进行适当简化。其中,文献[8]提出将开关磁阻电机定子槽内每相绕组等效为单一导体,从而简化了定子槽内双绕组的模型;文献[9]则提出将定子槽内双绕组采用分层等效模型的结构,进一步提高了模型的准确性及温度场分析结果的准确性;文献[10]则不仅将定子槽内每相绕组等效为单一导体,而且将绕组表面的多种绝缘材料等效为单一绝缘层,因而进一步简化了模型结构等;然而由于绕组多股导线间气隙的复杂性,上述在针对绕组的简化建模中均忽略掉了气隙的影响,因而造成了分析结果的准确性不高。为此,文献[11]针对绕组气隙提出一种等效建模方法,则有效提高了分析结果的准确性,但在该文献中,为简化绕组气隙的模型结构,设定绕组等效导体与定子槽壁及槽楔间以及两等效导体间具有等宽度的气隙,如此简化处理虽简化了气隙模型的结构,但使其分析结果与实际值间仍存在一定的差异,模型的准确性还有待进一步提高。为此,文中根据定子槽内双绕组气隙的基本特点,提出一种双绕组气隙的改进建模方法。文中介绍了双绕组气隙总截面积的计算方法,研究了双绕组气隙的模型结构与最佳气隙宽度的确定方法,并通过有限元分析与实验对该方法的有效性进行了验证。

## 1 电机损耗计算及边界条件界定

### 1.1 电机损耗计算

开关磁阻电机在运行过程中其内部因损耗而产生大量热量,这些热量一方面使电机内部温度迅速上升,另一方面则通过电机各部件与环境间进行热交换,并最终达到热平衡。因此,准确计算出电机内部各部件的损耗是保证温度场分析准确性的前提。

电机总损耗通过如下公式计算<sup>[12]</sup>:

$$p_{\Sigma} = p_{Cu} + p_{Fe} + p_{fw} \quad (1)$$

式中: $p_{\Sigma}$ 为电机总损耗; $p_{Cu}$ 为绕组铜耗; $p_{Fe}$ 为铁耗; $p_{fw}$ 为机械损耗。

绕组铜耗可由经验公式求得<sup>[12]</sup>:

$$p_{Cu} = qI_{ms}^2 R_p \quad (2)$$

式中: $q$ 为电机相数; $I_{ms}$ 为相绕组的电流; $R_p$ 为相绕组的电阻。

铁耗的计算公式如下<sup>[13]</sup>:

$$p_{Fe} = k_h f B_p^a + k_c (f B_p)^2 \quad (3)$$

式中: $k_h$ 为磁滞损耗系数; $f$ 为磁化频率; $a$ 为Steinmetz因子; $k_c$ 为涡流损耗系数; $B_p$ 为磁密值。

机械损耗为<sup>[12]</sup>:

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

式中: $n$ 为电机转速。

### 1.2 边界条件界定

对于采用自然冷却方式散热的开关磁阻电机,其机壳、端盖及散热筋的边界温度可设定为环境温度,开关磁阻电机散热方式主要体现在其机壳表面、端盖表面与周围空气间的自然对流换热以及定、转子间气隙的对流换热,其边界条件可表示为<sup>[14]</sup>:

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

式中: $\lambda$ 为导热系数; $q_0$ 为通过该边界的热流密度; $T_0$ 为边界温度; $\alpha$ 为对流传热系数; $T$ 为温度; $T_c$ 为流体温度。

对于对流传热系数 $\alpha$ 来说,机壳表面、电机端盖表面的对流换热系数 $\alpha$ 处处相等,其计算公式为<sup>[15]</sup>:

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

式中: $v$ 为电机各散热面表面风速。

而对于定、转子间气隙的对流换热系数 $\alpha$ 的计算,则需先计算出定、转子间气隙的雷诺数 $Re$ 及其临界雷诺数 $Re_l$ ,再通过比较两者的大小来确定其气隙内空气流动是层流还是湍流,从而确定其对流换热系数 $\alpha$ <sup>[16]</sup>。

1) 计算定、转子间气隙的雷诺数 $Re$ 及其临界雷诺数 $Re_l$ ,分别为:

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

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

式中: $d_1$ 为转子半径; $\delta$ 为定、转子间气隙的长度; $\omega_g$ 为转子转速; $m$ 为空气的运动粘度; $d_2$ 为定子半径。

2) 比较雷诺数 $Re$ 与临界雷诺数 $Re_l$ 的大小,确定定、转子间气隙的对流换热系数 $\alpha$ 。

若  $Re < Re_c$ , 表示定、转子间气隙的流动为层流, 则对流换热系数  $\alpha$  近似等于空气的导热系数;

若  $Re > Re_c$ , 表示定、转子间气隙的流动为湍流, 则其对流换热系数  $\alpha$  通过式(9)计算。

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

式中:  $\lambda_k$  为空气散热系数。

## 2 求解域模型的建立

采用有限元法对开关磁阻电机进行三维温度场分析时, 首先需要建立其三维温度场分析的求解域模型, 包括数学模型与三维有限元模型。

### 2.1 开关磁阻电机温度场分析数学模型

对于开关磁阻电机来说, 在直角坐标系下求解域内其三维温度场的导热微分方程为<sup>[17]</sup>:

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

式中:  $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$  分别为开关磁阻电机在  $x, y, z$  轴方向的导热系数;  $q_v$  为热源密度。

### 2.2 电机双绕组气隙等效建模方法

针对文献[11]在建立定子双绕组的气隙模型时存在的不足, 提出一种改进的绕组气隙建模方法。

在建立开关磁阻电机定子双绕组气隙的等效有限元模型前, 为简化分析, 首先假设电机定子槽为规则的梯形结构, 槽内绕组导线分布均匀紧密, 排列规则, 则其双绕组总气隙的等效截面积  $s_1$  为:

$$s_1 = s - 2n\pi(r+d)^2 \quad (11)$$

式中:  $s$  为定子槽的截面积;  $n$  为每相绕组中导线的匝数;  $r$  为绕组单匝导线的半径;  $d$  为绕组单匝导线表面的多种绝缘材料的厚度。

同时将定子槽内每相绕组多匝导线等效为单一导体, 其截面积  $s_2$  为:

$$s_2 = n\pi r^2 \quad (12)$$

另外, 导线表面包裹有多种绝缘材料, 如聚酰亚胺绝缘层、浸渍漆、漆膜等, 则将其等效为等效导体表面厚度处处相等的单一绝缘层, 其总截面积  $s_3$  为:

$$s_3 = s - s_1 - 2s_2 \quad (13)$$

基于上述假设, 本文提出的一种改进型绕组气隙建模方法, 具体为设两相绕组等效导体表面绝缘层与定子槽壁及槽楔间具有等宽度的气隙, 且称其为绕组气隙 1, 而两相绕组等效导体之间的气隙称之为绕组气隙 2, 绕组气隙 1 和绕组气隙 2 的宽度不一定相等, 其具体宽度需经数值分析与实验数据进行综合确定。

基于上述分析, 确定双绕组气隙的等效结构如图 1

所示, 其中,  $h_3$  为定子槽底的宽度,  $h_4$  为定子槽楔内表面的宽度,  $l_1$  为定子槽侧表面的长度,  $H$  为定子槽底至定子槽楔内表面的高度,  $\beta$  为定子槽底与定子槽侧表面的夹角。

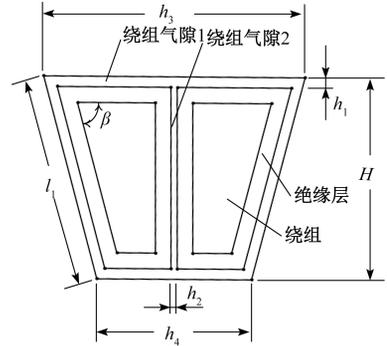


图 1 双绕组气隙的等效结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of equivalent structure of double winding air gap

根据上述双绕组气隙的等效结构及式(11)所确定的双绕组总气隙截面积  $s_1$ , 可得绕组气隙 2 的宽度  $h_2$  与绕组气隙 1 的宽度  $h_1$  间的函数关系为:

$$h_2 = \frac{s_1 - h_1(h_3 + h_4 + 2l_1)}{H - 2h_1} + \frac{4h_1^2}{(H - 2h_1)\sin\beta} \quad (14)$$

同时, 根据绝缘层的总截面积  $s_3$  及绕组气隙 1 与绕组气隙 2 的结构与宽度, 可确定等效导体表面绝缘层的宽度  $h_5$  的计算方法为:

$$h_5 = \frac{a + \sqrt{a^2 + 2bs_3}}{2b} \quad (15)$$

式中:  $a = h_3 + h_4 + 2H + 2l_1 - 4h_1 - 2h_2 - 8 \frac{h_1}{\sin\beta}$ ;  $b =$

$$4 + \frac{6}{\sin\beta}。$$

### 2.3 最佳气隙宽度确定方法

根据上述双绕组气隙的等效结构, 针对绕组气隙 1 选取某宽度值, 同时通过式(14)得到绕组气隙 2 对应的宽度值, 再结合电机其余部件的建模参数, 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, 得到电机的温度场分布图, 同时选取定子绕组等效导体表面某处的温度作为待测值; 通过选取绕组气隙 1 的不同宽度值, 基于上述方法得到相应的待测温度值, 并采用最小二乘法针对所获得的一系列绕组气隙 1 宽度及相应的温度数据进行数值拟合, 得到绕组气隙 1 宽度与其相应温度间的函数关系式; 再根据该函数关系式及定子绕组与其等效导体表面某处对应的实测温度, 即可得到绕组气隙 1 相应的宽度值, 该宽度值及根据式(14)所得绕组气隙 2 对应的宽度值即为开关磁阻电机定子槽内双绕组

建模所对应的最佳气隙宽度。

根据上述原理,首先需确定绕组气隙1的宽度取值范围,其下限值  $h_{1L}$  最小可取为0,而上限值  $h_{1H}$  最大对应于绕组气隙2宽度为0时所对应的宽度值,则具体取值范围为:

$$0 \leq h_{1L} < h_{1H} \leq \frac{(h_3 + h_4 + 2l_1) \sin\beta + \sqrt{(h_3 + h_4 + 2l_1)^2 - \frac{8s_3}{\sin\beta} \sin\beta}}{8} \quad (16)$$

在上述取值范围内,通过对绕组气隙1取一系列宽度值,并根据式(14)计算出相应的绕组气隙2宽度,再通过建立开关磁阻电机的三维有限元模型及进行相应的温度场分析,得到相应某待测点的温度值,最后采用最小二乘法对其进行数值拟合,得到绕组气隙1宽度与某待测点对应温度间的函数关系式为:

$$h_1 = a_0 + a_1 \cos(wT) + b_1 \sin(wT) + a_2 \cos(2wT) + b_2 \sin(2wT) \quad (17)$$

式中: $T$ 为定子绕组等效模型表面某处的温度; $a_0$ 、 $a_1$ 、 $b_1$ 、 $a_2$ 、 $b_2$ 、 $w$ 为函数的系数。

### 3 开关磁阻电机温度场计算

针对本文提出的电机双绕组气隙的改进建模方法,以一台额定功率为4 kW的12/8开关磁阻电机为例进行温度场计算,该电机的主要结构参数如表1所示。

表1 开关磁阻电机主要结构参数

Table 1 Main structural parameters of SRM

结构参数	数值	结构参数	数值
铁芯长度	140 mm	每槽线圈匝数	108
定子外径	164 mm	定子槽底宽度	25.2 mm
定子内径	100 mm	定槽楔内表面	14.9 mm
转子外径	99.8 mm	槽侧表面长度	20 mm
导线直径	1.18 mm	槽底至槽楔表面高度	18.6 mm
绝缘厚度	0.3 mm	槽底与槽侧表面夹角	75.2°

根据表1参数确定开关磁阻电机绕组气隙1的宽度取值范围,其下限值  $h_{1L}$  可取为0 mm,而上限值  $h_{1H}$  则取绕组气隙2宽度为0 mm时对应的宽度值,即由式(14)令绕组气隙2宽度为0 mm时可得绕组气隙1的宽度值为0.975 mm,由此可得绕组气隙1的宽度取值范围为0~0.975 mm。

在上述所确定的绕组气隙1宽度取值范围内,按间距值为0.025 mm选取40组数据,并利用Solidworks软件分别建立其三维有限元模型,再通过Ansys软件对其进行温度场分析,得到开关磁阻电机的温度场分布<sup>[18-20]</sup>,根据所得到的温度场分布图选取定子绕组等效模型表面

某处的温度值作为待测值,其相应的温度数据及对应的绕组气隙1宽度值如表2所示。

表2 绕组气隙1宽度与其对应的温度数据

Table 2 Winding air gap 1 width and its corresponding temperature data

宽度	0	0.025	0.05	0.075	0.1	0.125	0.15	0.175
温度	64.28	64.63	65.00	65.36	65.73	66.12	66.49	66.88
宽度	0.2	0.225	0.25	0.275	0.3	0.325	0.35	0.375
温度	67.28	67.67	68.09	68.52	68.93	69.57	69.80	70.26
宽度	0.4	0.425	0.45	0.475	0.5	0.525	0.55	0.575
温度	70.71	71.19	71.65	72.13	72.62	73.12	73.62	74.15
宽度	0.6	0.625	0.65	0.675	0.7	0.725	0.75	0.775
温度	74.69	75.22	75.78	76.35	76.95	77.53	78.16	78.81
宽度	0.8	0.825	0.85	0.875	0.9	0.925	0.95	0.975
温度	79.48	80.20	80.94	81.76	82.64	83.65	84.85	86.74

针对表2所示绕组气隙1宽度及相应的温度数据,采用最小二乘法对其进行数值拟合,得到绕组气隙1宽度与其对应温度间函数关系式的各项系数,即各系数  $a_0$ 、 $a_1$ 、 $b_1$ 、 $a_2$ 、 $b_2$ 、 $w$  分别为-2.941、-3.86、2.478、-0.667 3、0.586、-0.0461 2。

将上述系数分别代入式(17)中,得到开关磁阻电机定子槽内绕组气隙1宽度与其对应温度间的具体函数关系式为:

$$h_1 = -3.86 \cos(0.04612T) - 0.6673 \cos(0.09224T) - 2.478 \sin(0.04612T) - 0.586 \sin(0.09224T) - 2.941 \quad (18)$$

### 4 实验分析

为确定开关磁阻电机绕组气隙1和绕组气隙2的最佳宽度值,研制了一套额定功率为4 kW的开关磁阻电机实验装置,如图2所示。其中,温度传感器采用票PT100热敏电阻,分别设置在与定子绕组等效导体表面某待测点相对应的位置及定子铁芯,用于实时检测上述位置的实际温度,而电机机壳与端盖处则采用红外测温仪进行实时检测实际温度。

实验时环境温度为30℃,开关磁阻电机在额定工况下运行,待温度显示仪上的数值保持稳定不变时,分别测取开关磁阻电机各主要部件的稳态温度值,如表3所示。

表3 开关磁阻电机各主要部件的稳态温度值

Table 3 Steady-state temperature values of the main components of the switched reluctance motor

主要部件	定子绕组	定子铁芯	机壳	端盖
稳态温度/℃	79.30	45.40	39.54	38.25

根据表3所测定子绕组对应于待测点处的实际温度

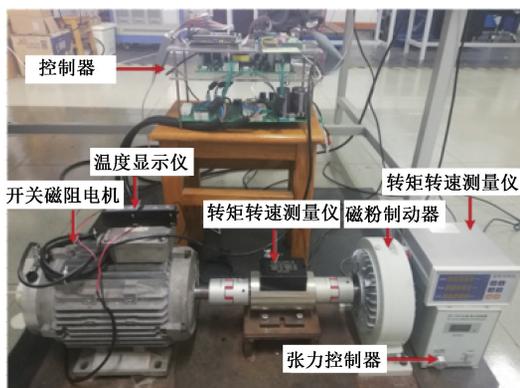


图 2 开关磁阻电机实验装置

Fig. 2 Experimental device for SRM

值,将其代入式(18),得到相应的绕组气隙 1 宽度,再结合式(14)计算得到相应的绕组气隙 2 宽度,所得到的宽度值即为绕组气隙 1 和绕组气隙 2 的最佳气隙宽度。

根据上述所得绕组气隙 1 和绕组气隙 2 的最佳气隙宽度,在上述相同条件下采用有限元法对电机进行相应的温度场分析,得到其温度场分布如图 3 所示,各主要部件的稳态温度值如表 4 所示。

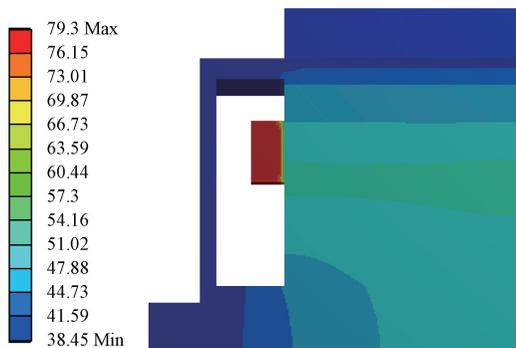


图 3 对应于最佳气隙宽度的开关磁阻电机温度场分布

Fig. 3 Temperature field distribution of switched reluctance motor corresponding to optimal air gap width

表 4 对应于最佳气隙宽度的电机各主要部件稳态温度值

Table 4 Steady-state temperature value of each main component of the motor corresponding to the optimum air gap width

主要部件	定子绕组	定子铁芯	机壳	端盖
稳态温度值/°C	79.30	46.07	40.25	38.45

同时,为便于说明本文提出的开关磁阻电机绕组气隙建模方法的效果,与文献[11]提出的等宽度气隙建模方法进行对比,因而在上述相同条件下采用有限元法对文献[11]提出的气隙建模法进行相应的温度场分析,得到开关磁阻电机相应的温度场分布如图 4 所示,各主要部

件的稳态温度值如表 5 所示。

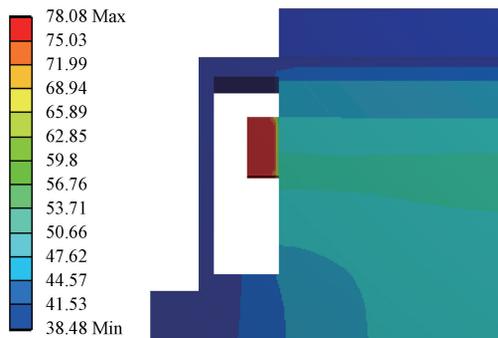


图 4 气隙等宽建模法开关磁阻电机温度场分布

Fig. 4 Air gap equal width modeling method for switching reluctance motor temperature field distribution

结合表 3~5,可得本文所提出的开关磁阻电机绕组气隙建模法与文献[11]提出的绕组气隙建模法所得电机各主要部件稳态温度值与相应实测温度值间的相对误差,如表 6 所示。

表 5 气隙等宽建模法电机各主要部件稳态温度值

Table 5 Air gap equal width modeling method steady state temperature value of each main component of the motor

主要部件	绕组端部	定子铁芯	机壳	端盖
稳态温度/°C	78.08	46.23	40.43	38.48

表 6 电机各主要部件稳态温度值与实测值间的相对误差

Table 6 Relative error between steady-state temperature values and measured values of each main component of the motor

方法	部件	相对误差/%
改进建模方法	定子绕组	0.00
	定子铁芯	1.48
	机壳	1.80
	端盖	0.52
等宽度气隙建模方法	定子绕组	1.54
	定子铁芯	1.83
	机壳	2.30
	端盖	0.60

由表 6 可见,本文提出的开关磁阻电机绕组气隙改进建模方法相对于文献[11]提出的等宽度气隙建模法,电机各主要部件稳态温度值与相应实测温度值间的相对误差均有明显降低,从而说明本文所提出的改进建模方法具有更好的效果,可有效提高开关磁阻电机温度场分析的精度。

## 5 结论

针对开关磁阻电机定子槽内双绕组间因存在不规则

气隙而导致其温度场分析建模困难的问题,提出一种双绕组气隙的改进建模方法。本文介绍了双绕组气隙总截面积的计算方法,研究了双绕组气隙改进建模法的模型结构与最佳气隙宽度的确定方法,并通过仿真与实验对其效果进行了验证,同时与文献[11]提出的等宽度气隙建模法进行了对比分析,结果表明,本文所提出的开关磁阻电机绕组气隙改进建模法相对于文献[11]提出的等宽度气隙建模法,电机各主要部件稳态温度值与其相应实测温度值间的相对误差均有明显降低,从而证明了该方法的有效性。

## 参考文献

- [1] YAN W, CHEN H, LIU X, et al. Design and multi-objective optimisation of switched reluctance machine with iron loss [J]. IET Electric Power Applications, 2019, 13(4): 435-444.
- [2] 饶盛华, 张小平, 张铸, 等. 基于果蝇算法的开关磁阻电机多目标优化研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(7): 1152-1158.  
RAO SH H, ZHANG X P, ZHANG ZH, et al. Study on multi-objective optimization of SRM based on FOA [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2017, 31(7): 1152-1158.
- [3] ARBAB N, WANG W, LIN C, et al. Thermal modeling and analysis of a double-stator switched reluctance motor [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2015, 30(3): 1209-1217.
- [4] MA J, LI J, FANG H, et al. Optimal design of an axial-flux switched reluctance motor with grain-oriented electrical steel [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(6): 5327-5337.
- [5] 赵振刚, 高立慧, 李川, 等. 基于FBG测温与热路模型的绕组热点温度研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(2): 294-300.  
ZHAO ZH G, GAO L H, LI CH, et al. Study on the winding hot-point temperature measurement based on FBG and thermal model [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(2): 294-300.
- [6] 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.
- [7] CHEN H, LV S, WANG Q. Temperature distribution analysis of a switched reluctance linear launcher [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2013, 41(5): 1117-1122.
- [8] WU W, DUNLOP J B, COLLOCOTT S J, et al. Design optimization of a switched reluctance motor by electromagnetic and thermal finite-element analysis [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2003, 39(5): 3334-3336.
- [9] POPESCU M, DORRELL D G, ALBERTI L, et al. Thermal analysis of duplex three-phase induction motor under fault operating conditions [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2013, 49(4): 1523-1530.
- [10] 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 Y, WANG Z, SHAN X T, 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.
- [11] 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, 106.  
LIU P, ZHANG X P, ZHANG ZH. 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, 106.
- [12] DIKO M, RAFAJDUS P, MAKYS P, et al. Design and parameter analysis of short-flux path switched reluctance motor in electrical vehicles [C]. 2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe), 2017: 1-6.
- [13] 董传友, 李勇, 丁树业, 等. 开关磁阻电机铁心损耗分析[J]. 电机与控制学报, 2015, 19(7): 58-65.  
DONG CH Y, LI Y, DING SH Y, et al. Iron loss analysis of switched reluctance motor [J]. Journal of Electric Machines and Control, 2015, 19(7): 58-65.
- [14] 吴柏禧, 万珍平, 张昆, 等. 考虑温度场和流场的永磁同步电机折返型冷却水道设计[J]. 电工技术学报, 2019, 34(11): 2306-2305.  
WU B X, WAN ZH P, ZHANG K, et al. Design of reentrant cooling channel in permanent magnet synchronous motor considering temperature field and flow field [J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2019, 34(11): 2306-2305.
- [15] 邵永, 刘赵森. 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.  
YAN Y, LIU ZH M. Analysis on Three-dimensional Transient Temperature Field of Induction Motor [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(30): 114-120.

- [16] 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.
- [17] HU Y, DING W, WANG T, et al. Investigation on a multimode switched reluctance motor: Design, optimization, electromagnetic analysis, and experiment [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(12): 9886-9895.
- [18] 于圣龙, 白瑞林, 李新. 负载对分数槽永磁电机转矩波动的影响[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(12): 1781-1789.  
YU SH L, BAI R L, LI X. Effect of load on torque ripple of fractional slot permanent magnet motor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(12): 1781-1789.
- [19] 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 P, ZHANG X P, KUANG S J, 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.
- [20] 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 X H, WU J F, SHI N, et al. Calculation of dynamic temperature rise of electric vehicle drive motor considering driving conditions [J]. Journal of Instrumentation, 2018, 39(7): 127-133.

## 作者简介



刘苹, 2017 年于湖南科技大学潇湘学院获得学士学位, 现为湖南科技大学硕士研究生, 主要研究方向为电机与电器。

Liu Ping received his B. Sc. degree from Xiaoxiang College of Hunan University of Science and Technology in 2017. Now, he is a M. Sc. candidate at Hunan University of Science and Technology. His main research interests include motor and electrical appliances.



张小平 (通信作者), 1987 年于西安交通大学获得学士学位, 2009 年于中南大学获得博士学位, 现为湖南科技大学教授, 硕士生导师, 主要研究方向为电力电子与电力传动、智能控制等。

E-mail: zxp836@163.com

Zhang Xiaoping (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Xi'an Jiaotong University in 1987, Ph. D. degrees from Central South University in 2009. Now he is a professor and M. Sc. supervisor at Hunan University of Science and Technology. His main research interests include power electronics and electrical driver system, intelligent control.



匡斯建, 2016 年于湖南科技大学获得学士学位, 2019 年于湖南科技大学获得硕士学位, 主要研究方向为电机与电器。

E-mail: sq1437self@163.com

Kuang Sijian received his B. Sc. degree from Hunan University of Science and Technology in 2016, M. Sc. degree from Hunan University in 2019. His main research interests include motor and electrical appliances.