

# 集肤效应对高密度永磁电机温升的影响

张琪<sup>1</sup>, 张俊<sup>1</sup>, 黄苏融<sup>1</sup>, 鲁茜睿<sup>1</sup>, 李益丰<sup>2</sup>

(上海大学机电工程与自动化学院, 上海市 200072, 2 株洲南车时代电动汽车股份有限公司, 湖南省 412001)

**摘要:** 高密度永磁电机高速运行时定子绕组的集肤效应现象不容忽视。本文以一台高密度永磁电机为例, 运用有限元仿真软件分析最高转速运行时定子槽内导线电流密度分布不均匀现象, 不同位置导体电阻值增量的变化规律, 以及定子绕组选用不同线径和并绕根数设计方案对电阻值增量和电机温升的影响。样机试验结果和仿真计算数据比较吻合, 验证了仿真分析方法的正确性和有效性。

**关键字:** 高密度永磁电机; 交流电阻; 集肤效应; 电流密度; 流固耦合

## Influences of Skin Effect on Temperature Rise of High Density Permanent Magnet Motor

ZHANG Qi ZHANG Jun HUANG Su-rong LU Xi-rui CHEN Yi

(1 Mechanical Engineering and Automation Institute, Shanghai University, Shanghai 200072, China

2 Hunan CSR Times Electric Vehicle Co., Ltd, Zhuzhou 412007, China.)

**Abstract:** Under high speed operation, the winding skin effect of high density permanent motor cannot be ignored. In this paper, the prototype machine is simulated and analyzed with the Finite Element (FE) software for its non-uniform distribution of current density in winding, and resistance enhancement coefficients in different position along the radial of the slot, and influence of the wire diameter and number of strands on the rise of motor temperature. The good match of the test data with simulated data verifies the effectiveness and precision of the simulation method.

**Key words:** High density permanent magnet motor; AC winding; skin effect; current density; fluid-solid coupling

## 0 引言

高密度永磁电机中电磁负荷和热负荷的选取往往是趋于极限, 导致了单位体积的损耗和发热量明显增大, 磁路高度饱和, 其温升和散热问题比常规电机要严重得多<sup>[1]</sup>。然而电机温升是衡量电机性能指标和电机使用寿命的一个重要参数, 同时电机的温升对永磁电机的转矩、效率等电磁性能有着很大的影响。因此, 高密度永磁电机的温升分析必不可少。

电机中的热源主要由铁耗和铜耗产生。目前分析铁耗的方法有很多, 比较经典的铁耗计算模型是 Bertotti 损耗分离模型和胡虔生交变磁化正交分解模型等<sup>[2-3]</sup>。铜耗的精确计算研究相对较少。随着电流频率的不断提高, 电机中高频电流引起的导线集

肤效现象会更加严重, 导致交流电阻变大, 铜耗增加, 电机的工作温度升高。因此, 对运行转速经常变化的高密度永磁电机来说, 高速运行时的集肤效应现象不容忽视。交流电阻计算的准确性直接影响到高密度永磁电机温升的计算精度, 甚至会影响到电机结构设计合理性的判断。

本文以一台 48 槽 8 极、88kW 高密度永磁电机为例, 采用 Ansoft/Maxwell 2D Eddy-Current 软件, 仿真计算由集肤效应引起的交流电阻增加系数, 并基于流固耦合的基本理论, 采用 Ansys-Fluent 软件, 仿真计算计及集肤效应的电机温升, 并与实验结果进行对比, 验证分析方法的正确性和可行性。

## 1 集肤效应的基本理论

当槽中导线通入交流电时, 由于导线沿槽高截面部分的漏磁通匝链数不相等, 因此产生的感应电势不一样, 由此在导线内部形成涡流, 使得电流在

\* 基金项目: 国家 863 重大项目(2011AA11A236, 2012AA110801); 上海市科委科技攻关项目(11521100503)

导线截面上的分布不均匀, 导线中的电流趋向于表面, 产生集肤效应, 使交流电阻比直流电阻要大。

为便于分析作如下假设:

(1) 电机槽型为开口矩形槽, 槽宽为  $b_s$ , 槽内有  $n$  根载流导线, 导线的高度和宽度分别为  $a$  和  $b$ , 导线内的电流为  $i = I_m * \cos(\omega t)$ ,  $I_m$  为电流幅值,  $\omega$  为电角速度, 具体见图 1。

(2) 槽内磁场强度矢量均平行于槽底, 即  $\dot{H}_y = \dot{H}_z = 0$ , 且  $\dot{H}_x$  仅为  $y$  的函数。

(3) 忽略铁心内的磁压降。

(4) 忽略导线之间的绝缘厚度。

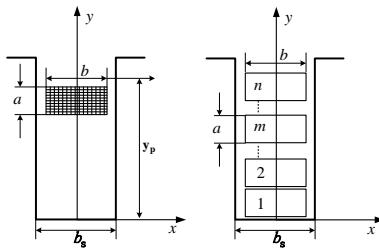


图 1 矩形开口槽和槽内导线示意图

根据安培环路定律和电磁感应定律, 对于正弦稳态情况, 可以得出  $x$  方向的磁场强度  $\dot{H}_x$  与导线中电流密度  $\dot{j}_z$  之间的关系式<sup>[4]</sup>:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial^2 \dot{H}_x}{\partial y^2} = k^2 \dot{H}_x \\ \frac{\partial \dot{H}_x}{\partial y} = -\frac{b}{b_s} \dot{j}_z \\ k = \sqrt{j \omega \frac{b}{b_s} \mu_0 \sigma} = \frac{(1+j)}{\Delta} \\ \Delta = \sqrt{\frac{b_s}{b} \frac{2}{\omega \mu_0 \sigma}} \end{array} \right. \quad (1)$$

式中:  $\Delta$  为透入深度,  $\omega$  为电角速度,  $\mu_0$  为真空磁导率,  $\sigma$  为铜线的电导率。

电场强度  $\dot{E}_z$  和电流密度  $\dot{j}_z$  的关系为:

$$\dot{E}_z = \frac{1}{\sigma} \dot{j}_z \quad (2)$$

进入第  $m$  根导线的有功功率  $P$  为<sup>[4]</sup>:

$$P = -\frac{1}{2} b_s l \cdot \operatorname{Re} \left[ \left( \dot{E}_z \dot{H}_x^* \right)_{y=ma} - \left( \dot{E}_z \dot{H}_x^* \right)_{y=(m-1)a} \right] \quad (3)$$

第  $m$  根导线的交流电阻  $R_{\sim m}$  和直流电阻  $R_{=m}$  分别为:

$$\left\{ \begin{array}{l} R_{\sim m} = \frac{2P}{I_m^2} \\ R_{=m} = \frac{l}{\sigma b a} \end{array} \right. \quad (4)$$

式中:  $l$  为导线计算长度。

由式 (3)、(4) 可得, 第  $m$  根导线电阻增加系数  $K_{pm}$  为:

$$\begin{aligned} K_{pm} &= \frac{R_{\sim m}}{R_{=m}} \\ &= \xi \frac{\operatorname{sh} 2\xi + \sin 2\xi}{\operatorname{ch} 2\xi - \cos 2\xi} + m(m-1) 2\xi \frac{\operatorname{sh} \xi - \sin \xi}{\operatorname{ch} \xi + \cos \xi} \end{aligned} \quad (5)$$

式中:  $\xi = a / \Delta$ 。

槽内  $n$  根导线电阻平均增加系数  $K_p$  为:

$$K_p = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n K_{pm} \quad (6)$$

由式 (1) ~ (6) 可以看出, 导线的集肤效应随电导率、频率的增加而增加, 且与导线的几何尺寸有关。

假设槽内有 12 根扁导线, 电流频率为 766.7Hz, 槽宽  $b_s$  和导线宽度分别为 5.8mm 和 2.7mm, 从槽底向槽口各块导线的电阻增加系数如图 2 所示。

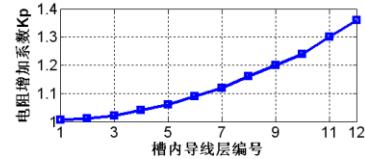


图 2 电阻增加系数的解析法计算值

从图 2 可以看出, 沿着槽底至槽口方向导线的集肤效应逐渐增加。定子槽口位置导线的集肤效应最为明显, 电阻增加系数为 1.36, 槽内导线的平均电阻增加系数为 1.12。

## 2 集肤效应的有限元仿真分析

高密度永磁电机样机参数如表 1 所示。

表 1 样机参数

槽数/极数	48/8	轴向长度 (mm)	160
额定/峰值(kW)	42/88	最高转速 (rpm)	11500
定子外径 (mm)	230	并联支路数	8
转子外径 (mm)	155.2	匝数	12

根据样机尺寸, 在 Ansoft/Maxwell 2D Eddy Current 软件中建模。1 匝线圈由 8 根线经为 0.8mm 的导线构成, 导线之间的间距为 2 层漆膜的厚度 0.084mm, 上、下层分别有 48 根导线。层间绝缘厚度 0.3mm, 导线编号和三相绕组排列如图 3 所示。

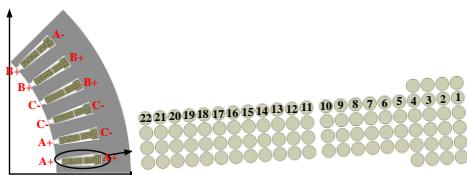
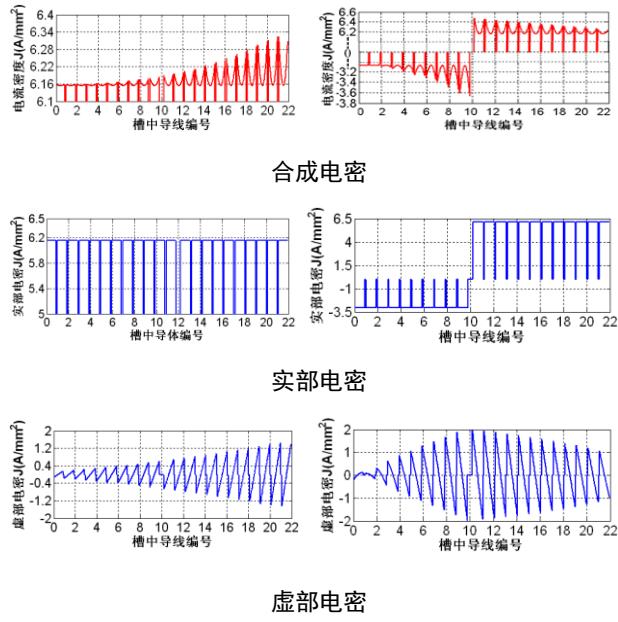


图 3 样机在 Maxwell 2D Eddy-Current 中仿真模型

若在 A、B、C 三相绕组中通入幅值为 24.8A，频率为 766.7Hz 的三相对称电流，在初始时刻，槽中电流密度分布仿真结果如图 4 所示。

图 4  $t=0$  时槽中电流密度分布有限元仿真图

由图 4 可以看出，同一根导线中实部电密几乎相等，虚部电密在每一根导线中有正负两个方向，并基本上沿径向中心位置呈对称分布，其数值比实部电密要小，合成电密则在导线中间位置比较低，接近上下表面位置电密偏高。所以，每根导线中的电流密度径向分布不均匀。

比较多根导线的电密可以看出，槽中上下层均为 A+（同相）的绕组实部电密相同，虚部电密沿着槽底到槽口方向逐渐增加，槽口处最大；槽中上层为 A+下层为 C-（不同相）的绕组，虚部电密最大处在 A+和 C-绕组相邻处，槽口和槽底处的虚部电密较小。

公式 (7) 可以计算由有限元仿真数据得到的电阻增加系数：

$$k = \frac{R_a}{R_e} \approx \frac{\sum_{i=1}^n |J_i|^2 \Delta S_i}{J_z^2 S} = \frac{\sum_{i=1}^n (J_{Ri}^2 + J_{li}^2) \Delta S_i}{J_z^2 S} \quad (7)$$

式中  $R_a$  为交流电阻值， $J_i$ 、 $J_{Ri}$ 、 $J_{li}$  和  $\Delta S_i$  分别为第

$i$  个单元的合成密度、实部电密、虚部电密和面积， $R_e$  为直流电阻值， $J_z$  为直流导线电流密度， $S$  为导线截面积。

以一个槽中上下层均为 A+绕组为例，有限元仿真计算 A+绕组沿槽底至槽口方向各导线的电阻增加系数，具体如图 5 所示。

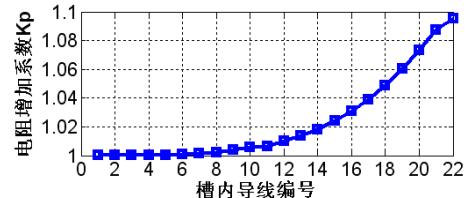


图 5 上下层同为 A+绕组的电阻增加系数有限元仿真值

从图 5 可见，从槽底到槽口，导线的集肤效应越来越严重，电阻增加系数也逐渐增加，仿真结果和理论分析一致。样机交流电阻平均增加系数计算值约为 1.032。

为了仿真分析定子绕组选用不同线径和并绕根数设计方案时的集肤效应现象，在保证电机槽满率几乎不变的前提下，表 2 给出了选用不同线径与并绕根数设计方案时电阻增加系数的有限元仿真结果。

表 2 选用不同线径与并绕根数设计方案电阻增加系数

并绕根数	导线直径 D(mm)	电阻增加系数 kp
8	0.8	1.032
4	1.15	1.067
2	1.64	1.12

由表 2 可见，随着线径增大、并绕根数的减小，电阻增加系数逐渐增加。若以 8 根并绕为基准的话，4 根并绕和 2 根并绕方案电阻增加系数分别增加了 3.4% 和 8.5%。因此在选择导线时，导线的线径不宜过大，但受制造工艺的影响也不宜选择太细，两者需综合考虑。本样机选用线径 0.8mm、8 根并绕方案。

### 3 计及集肤效应的高密度永磁电机流固耦合温度场仿真

#### 3.1 样机热源的确定

样机铜耗根据文中介绍的方法求出，铁耗采用 Ansoft Maxwell 2D 软件计算，磁钢由于分段式结构，磁钢涡流损耗借助 Ansoft Maxwell 3D 软件计算。表 3 给出了样机在 11500rpm 最高转速运行时各种损耗和生热率的计算值。

表 3 11500rpm 最高转速运行时样机损耗和生热率计算值

损耗类型	额定损耗值 (w)	生热率(w/m^3)
铜耗	488.5	936224.9
定子铁耗	2713.1	955105.2
转子铁耗	296.2	80584.3
磁钢涡流损耗	4.67	18242.18

### 3.2 流固耦合温度场仿真计算

1)在 Ansys-Fluent 软件平台建立仿真模型, 具体如图 6 所示。

2)边界条件: 冷却水流速度 1.14m/s, 初始温度 34.4°C, 电机为一密封结构, 绕组端部的散热忽略, 电机中热源平均分布。

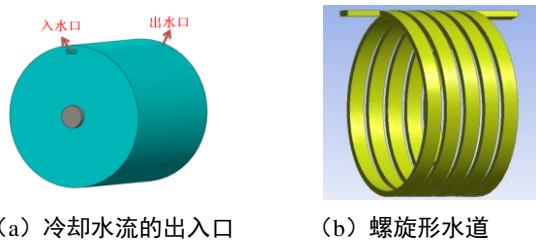


图 6 电机冷却系统简图

### 3) 11500rpm 最高转速运行时样机的温度场分布

样机运行在转速 11500rpm、输出转矩 37N.m 时, 计及导线集肤效应的流固耦合温度场仿真结果如图 7 所示。

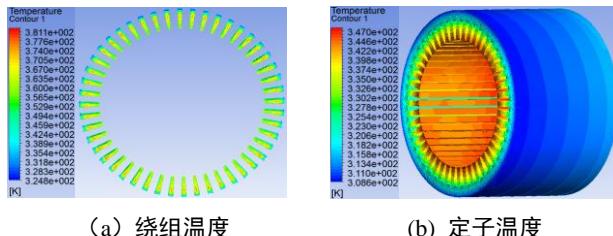


图 7 计及集肤效应的样机流固耦合温度场仿真结果

从图 7 可以看出, 电机中绕组最高温度 107.95°C (381.1K), 定子最高温度 73.85°C (347K)。

表 4 给出了选用不同线径和并绕根数设计方案时, 绕组最高温度仿真计算值。

表 4 采用不同线径与并绕根数时绕组最高温度仿真数据

并绕根数/线径(mm)	定子温度 (°C)	绕组温度 (°C)
8/0.8	73.85	107.95
4/1.15	74.35	109.35
2/1.64	74.75	111.95

由表 4 可见, 8 根并绕电机的绕组温升最低, 2 根并绕绕组温度相对较高, 相差约 4°C。所以, 对温升指标比较苛刻的高密度永磁电机来说, 设计中应该尽可能选用较细的导线, 可以有效抑制导线中的集肤效应现象, 降低绕组温升。

## 4 样机温升的实验验证

实验中分别在样机机座外侧、定子铁心及端部绕组的内侧放置热电偶测取温度; 散热水箱的入、出水口分别放置测温计测取水温, 如图 8 所示。

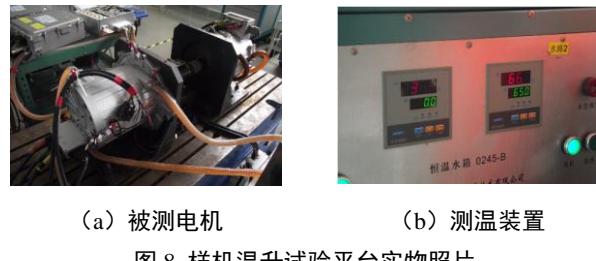


图 8 样机温升试验平台实物照片

样机在转速 11500rpm、输出转矩 37Nm、运行 32min 系统温升稳定后定子绕组的最高温度为 110°C。考虑集肤效应影响后, 流固耦合温度场仿真得定子绕组的最高温度为 107.95°C, 仿真结果和实验结果比较吻合, 充分说明了该分析方法的正确性。

## 5 结论

(1) 通过对交流电阻的分析计算可知, 绕组中通入三相交流电时, 导体横截面的电流密度分布不均匀, 槽中上下层为同相的绕组, 沿着槽底至槽口方向, 导线电阻的增加系数逐渐增加; 槽中上下层为不同相的绕组, 导线电阻增加系数最大出现在上下层的相邻处。

(2) 电机高速运行时, 在槽满率基本不变的前提下, 定子绕组选用不同的线径与并绕根数, 集肤效应有明显的差异。对温升指标苛刻的高密度永磁电机, 设计中必须考虑集肤效应对电机温升的影响, 多根并绕的细导线能有效抑制集肤效应现象, 降低绕组温升。

(3) 基于流固耦合的基本理论, 采用 Ansys-Fluent 软件, 仿真计算了选用不同线径与并绕根数设计方案对电机温升的影响。样机温升仿真数据与实验测试结果比较吻合, 证明了分析方法的正确性和可行性。

## 参考文献:

- 【1】张琪, 黄苏融, 王伟旭, 郭建文. 高密度车用永磁电机流固耦合传热仿真分析[J], 电机与控制应用, 2012 年 8 期, 86-90
- 【2】G. Bertotti. Direct Relation between Hysteresis and Dynamic Losses in Soft Magnetic Materials. Euro physics Conference on Magnetic Materials for Applications, Grenoble,

France, 1985. ECMMA:389-392

【3】.黄允凯, 胡虔生, 朱建国.永磁无刷直流电机铁耗计算方法.电机与控制应用.2007, 24(04):6-9

【4】.汤蕴璆, 梁艳萍编著. 电机电磁场的分析与计算. 2010,99-104

作者简介:

张琪, 女, 1961.10, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电机理论与设计, 新结构电机, [qizhang@staff.shu.edu.cn](mailto:qizhang@staff.shu.edu.cn)。

张俊, 男, 1987.11, 硕士研究生, 研究方向为永磁电机的

电磁场以及温度场研究。

黄苏融, 男, 1953.12, 教授, 博士生导师, 研究方向为电机设计及控制, 通讯作者。

鲁茜睿, 女, 1989.4, 硕士研究生, 研究方向为永磁电机的温度场研究。

李益丰, 男, 。