第 36 卷第 3 期　　河 北 科 技 大 学 学 报　　Vol. 36, No. 3
2015 年 6 月　　Journal of Hebei University of Science and Technology　　June 2015

文章编号:1008-1542(2015)03-0279-07　　doi:10.7535/hbkd.2015yx03009

永磁转子偏转式三自由度电机热特性分析

李　争,邢殿辉,乜　玮,高培峰,杜　浦,马海心

(河北科技大学电气工程学院,河北石家庄　050018)

摘　要:针对新型永磁转子偏转式三自由度电机实用化设计中的热安全性及热稳定性问题,对该电机进行了发热特性分析。利用有限元分析软件对该新型电机在额定及过载大电流工作情况下的生热情况进行温度场仿真计算,得出电机在不同工作状态下的温度分布云图。研究结果验证了该新型电机结构设计的合理性,为该类电机结构的优化及性能指标的提升提供了借鉴和参考。

关键词:电机学;永磁电机;偏转式;三自由度电机;热分析;损耗

中图分类号:TM351　　**文献标志码:**A

Thermal characteristics analysis of a novel 3-DOF deflection type PM motor

LI Zheng, XING Dianhui, NIE Wei, GAO Peifeng, DU Pu, MA Haixin

(School of Electrical Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China)

Abstract: Concerning the problem of the thermal safety and thermal stability of a novel 3-DOF deflection type PM motor, the thermal characteristics of this motor are analyzed. The heat production of this novel motor working in the rated and overload conditions is simulated for temperature field using finite element analysis software, and the motor's temperature contours under different operating conditions are derived. The research results validate the rationality of the structure design of this proposed novel motor, which provides a reference for the structure optimization and performance indicator improvement of this kind of motor.

Keywords: electric machinery; PM motor; deflection type; 3-DOF motor; thermal analysis; losses

永磁多自由度电机与传统多自由度电机相比具有占用空间小、系统效率高、磁能积高等优点,在航天飞行器、雷达、机械关节等领域有着广阔的应用前景引起人们的广泛关注。电机在工作中的温升问题直接关系到电机的安全性、使用寿命和运行可靠性,而对于永磁电机更加关注的是电机因温度过高引起永磁体产生不可逆退磁现象及电机内部传感器受损等问题[1]。目前对永磁电机的生热情况进行分析多采用二维建模仿真的方法,这种分析方法准确性较低且不能对电机整体的温度分布情况进行分析,具有一定的局限性[2]。本文为研究一种新型永磁转子偏转式三自由度电机的热安全性及工作稳定性,对该电机在额定工作状态下及过载大电流工作状态下的发热情况进行三维仿真分析,并重点分析了转子永磁体在不同工作电流下的温升情

收稿日期:2015-03-30;修回日期:2015-05-03;责任编辑:李　穆

基金项目:国家自然科学基金(51107031);河北省自然科学基金(E2014208134)

作者简介:李　争(1980—),男,河北石家庄人,副教授,博士,硕士生导师,主要从事特种电机及其控制方面的研究。

E-mail:lzhfgd@163.com

李　争,邢殿辉,乜　玮,等.永磁转子偏转式三自由度电机热特性分析[J].河北科技大学学报,2015,36(3):279-285.

LI Zheng, XING Dianhui, NIE Wei, et al. Thermal characteristics analysis of a novel 3-DOF deflection type PM motor[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2015, 36(3): 279-285.

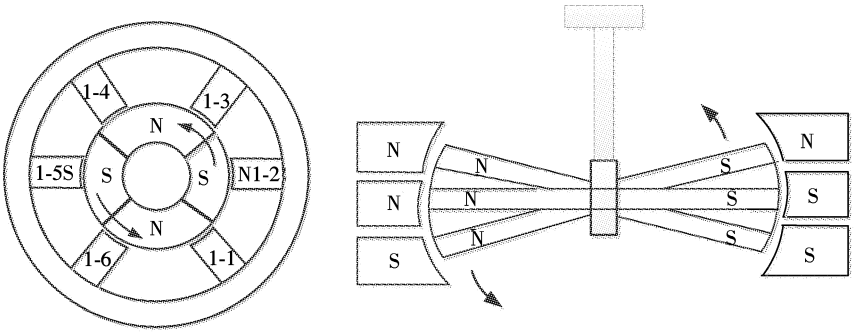
况。分析结果得出的电机内部温度场分布云图可清楚显示出电机各部分的温升情况，进而验证该结构电机设计的合理性并掌握工作过程中的发热情况。

目前对电机进行温度场计算的方法主要包括简化公式法、等效热路法、等效热网络法、有限元法和有限差分法。其中有限元法由于其具有单元剖分灵活，可按求解需要改变单元网格大小，对于复杂的模型、边界条件及不同的材料属性都能灵活地进行运算，仿真结果直观易于分析等优点，是目前最常用的电机热分析方法。随着计算技术的迅猛发展，出现了很多基于有限元数值分析方法进行热分析的仿真软件，其中 ANSYS WORKBENCH 有限元仿真软件可对流体、电场、磁场及温度场等进行仿真分析[3]。ANSYS WORKBENCH 热分析模块利用热力学第一定律建立热平衡方程，并通过有限元算法计算各节点温度，可对热传导、热对流、热辐射 3 种热传递方式进行分析。结合所研究电机的特点及有限元数值分析法的优点，本研究采用 ANSYS WORKBENCH 有限元仿真软件中的稳态热分析模块对该新型永磁电机进行热仿真分析[4-6]。

1 电机结构及工作原理

1.1 电机结构

本文中进行热分析的永磁转子偏转式三自由度电机的结构如图 1 所示。其永磁转子采用上、中、下三层结构，形状近似“蝶形”，永磁体每层都由 N，S 两对磁极交替排列组成且相邻两层的夹角为 20°。电机定子线圈也采用三层结构，每层 6 个线圈共 18 个线圈。通过对不同线圈电流大小及方向的控制可使电机进行连续自转并在此基础上实现一点角度的偏转，进而实现三自由度运动。电机结构参数如表 1 所示。



a) 结构俯视图　　b) 结构剖面图

图 1 电机结构图

Fig. 1 Motor structure

表 1 电机结构参数

Tab. 1 Motor structure parameter

参数	数值
转子外径 R_r/mm	16
转子内径 R_b/mm	5
定子外径 R_0/mm	90
定子内径 R_1/mm	78
每层转子高度/mm	90
定转子间气隙长度/mm	78

1.2 电机工作原理

永磁转子偏转式三自由度电机的自转及偏转运动是由于定子线圈通直流电后产生的磁场和永磁转子磁场相互作用产生的。由图 1 可以看出，当给电机上中下三层定子线圈通以相同方向的电流时，作用在电机转子上的切向电磁力会驱动电机沿 Z 轴自转，当对三层定子线圈通以不同方向的电流时，电机可实现沿 X，Y 轴的偏转运动。由于受到电机定转子结构的限制，该电机的偏转运动被限定在一定的角度范围内。而根据电机的磁场和转矩特性当电机自转转矩达到最小值时刻之前改变线圈的通电策略则电机可实现连续自转。因此对电机不同位置的定子线圈分别进行控制时可使电机完成连续的三自由度运动。

2 电机热分析温度场基本理论

2.1 电机中热量传递方式

热量的传递在自然界中普遍存在，总体来讲热量在电机中传递同样包括 3 种方式：热传导、热对流、热辐射[7-8]。

1)热传导是指相互接触的物体间能量由高能粒子向低能粒子传递的过程，傅里叶定律说明单位时间内等温面上的热量是与各点在等温面的法线方向上的空间温度变化率即温度梯度有关系的，即

$$q=-\lambda \mathrm{grad}\ T, \tag{1}$$

式中：q 代表热流强度；λ 代表导热系数；grad 代表温度梯度；负号代表方向。温度梯度可表示为

$$\text{grad } T=\frac{\partial T}{\partial x}\boldsymbol{i}+\frac{\partial T}{\partial y}\boldsymbol{j}+\frac{\partial T}{\partial z}\boldsymbol{k}, \tag{2}$$

式中：$\boldsymbol{i},\boldsymbol{j},\boldsymbol{k}$ 是沿着 x,y,z 轴的单位矢量。

2)热对流由微观和宏观 2 种形式的能量交换构成，微观能量交换指分子运动引起的能量交换；宏观能量交换指流体的运动引起的能量交换。影响这些能量交换的因素有很多，包括物体表面形状及换热介质的热物特性等。通过总结热对流的各种不同情况可写出热对流的数学模型：

$$q=\alpha(T_1-T_2), \tag{3}$$

式中：α 为对流换热系数；q 为热流强度；T_1 为物体表面温度；T 为换热介质温度。

3)热辐射指物体在一定温度下所释放出的能量，不需要有介质存在[9]。热辐射传热方式可以由斯蒂芬-波尔茨曼定律揭示，即

$$q=\sigma T_s^4, \tag{4}$$

式中：T_s 是物体表面的绝对温度；σ 是斯蒂芬-波尔茨曼常数，或者称为黑体辐射常数，它的值一般为5.67×10^{-8} W/(m^2 · K^{-4})。

若实际情况是一个小表面和一个完全包围它的大表面之间的净辐射换热，净辐射热流 Q 可表示为

$$Q=\varepsilon A\sigma(T_s^4-T_{\text{sur}}^4), \tag{5}$$

式中：A 为小表面面积；ε 为表面黑度即发射率，其值与物体的种类及表面状态有关，一般小于 1；T_{sur}为大表面的温度。

2.2　温度场计算数学模型

温度场法是基于数值运算来求解热传导方程，由热量传递方式可知，热传导方程为

$$\lambda_x\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\lambda_y\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\lambda_z\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}+p=c\rho\frac{\partial T}{\partial t}, \tag{6}$$

式中：λ 为沿不同方向的导热系数；ρ 为密度；c 为比热容；T 为温度；p 为计算对象单位体积生热率。

温度场法的研究由整体向局部转变，从宏观向微观转变。在研究稳态温度场中，上述热传导方程转化为 $\nabla^2 T+\frac{p}{\lambda}=0$，常见的边界条件分为以下 3 类[10-11]。

1)第 1 类边界条件(温度边界条件)：

$$T(x,y,z)|_{S_1}=T_c; \tag{7}$$

2)第 2 类边界条件(热流边界条件)：

$$-\lambda\frac{\partial T}{\partial n}|_{S_2}=q_0; \tag{8}$$

3)第 3 类边界条件(热交换边界条件)：

$$-\lambda\frac{\partial \lambda}{\partial n}|_{S_3}=\alpha(T-T_0), \tag{9}$$

式中：T_c 为边界面 S_1 上的给定温度；q_0 为流入边界面 S_2 上的热流量；λ 为导热率；α 为边界面 S_3 上的换热系数。

2.3　有限元热分析基本思想

有限元软件可以处理上述 3 种热传递方式，还可以分析存在的相变、内热源和接触热阻等问题[12]。概括的讲，有限元法的基本思想包括：

1)假想把连续的系统进行分割，分割出有限个单元，在有限元系统里充当节点元素；

2)对每一个单元建立求解未知量与节点之间的相互作用关系，在有限元系统中，每个节点都有各自的节点坐标系和对应的节点自由度，不同的节点有不同的自由度；

3)把这些单元按一定的条件集合起来，引入边界条件，构成方程组，求解未知量。即有限元进行热分析的实质是将具有无限个自由度的连续系统，理想化为有限个自由度的单元集合体，使之可以进行数值求解。

3　电机内发热源计算

电机作为一种复杂的能量转换装置，在运动过程中会产生各种损耗，这些损耗大部分转化为热的形式使

电机温度升高。在计算电机温升的过程中热源的确定及计算十分重要，一般情况下影响电机生热的损耗有铜耗(绕组损耗)、铁心损耗和机械损耗等[13-14]。

3.1 绕组损耗

铜耗即绕组损耗，由于本研究对象为永磁电机，转子为永磁体没有线圈，故铜耗都发生在定子线圈上。线圈通电时铜耗大小可表示为

$$P_{Cu}=\rho J^2=\rho_0[1+\beta(T-T_0)J^2], \tag{10}$$

式中：ρ_0 为在 T_0 温度时导线的电阻系数；T 为温度；ρ 为温度系数；J 为电流密度。

3.2 铁芯损耗

对于永磁电机而言铁耗指交变的磁场穿过定子铁芯或者转子永磁体时产生的涡流损耗和磁滞损耗。涡流损耗正比于转速的平方，磁滞损耗正比于转速，故电机的转速越高铁耗越大[15]。本文中电机转子为永磁体虽没有外加电源的作用，但由于电机运行时产生气隙磁场谐波的作用，也会产生一定的涡流损耗。本电机所用电源为直流电且电机主要进行中低速范围的多自由度运动，故电机气隙磁场谐波对转子的影响较小，且该电机转子的特殊三层结构设计可进一步减少涡流损耗。相比于定子铁耗而言，永磁电机的转子铁耗要小的多，故在分析时可予以忽略。由于计算电机的铁耗比较复杂，一般需先进行磁场分析和实验，再应用经验公式计算出电机铁耗：

$$P_{Fe}=K_aG_{Fe}, \tag{11}$$

式中：K_a 为经验系数；G_{Fe}为铁心净用铁量。

3.3 机械损耗

机械损耗主要指电机各部件之间的摩擦损耗，包括轴承摩擦损耗、通风损耗及电刷摩擦损耗等[16]。通常情况下对电机机械损耗的准确计算比较复杂，一般都是根据经验数据或者实验数据进行估算。由于该电机的机械损耗较小，对电机温升影响不大，故在计算中可忽略机械损耗。

4 电机有限元热分析模型的建立

4.1 建立模型

利用 ANSYS WORKBENCH 三维有限元仿真平台中的热稳态分析模块来分析新型永磁转子偏转式三自由度电机的发热特性。该电机采用定转子三层结构，由于电机线圈较多、结构复杂，为清楚的观察到电机内部各层绕组的温升情况，考虑到电机的对称性可对电机进行切分，进行局部热分析[17-19]。图 2 为电机整体模型图，图 3 所示为电机局部模型网格划分图。

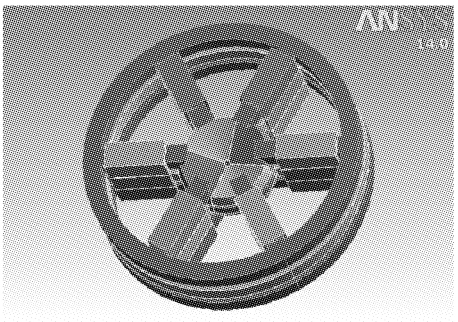


图 2 电机模型图

Fig. 2 Motor model diagram

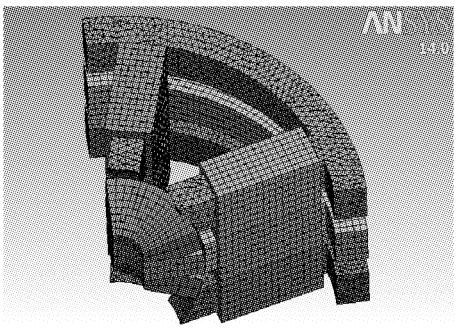


图 3 电机局部模型网格划分图

Fig. 3 Part of the model mesh diagram

4.2 边界条件

在软件进行热分析之前，需要对所建模型的求解区域进行边界条件设置[20]。为了简化分析过程，对电机模型做如下假设：1)不考虑电机端部散热的影响；2)忽略电机外壳对电机整体温升的影响；3)不考虑转子永磁体与转子轴之间的热传递。基于上述假设在永磁转子铁芯内径部分施加第二类边界条件也就是绝热边界条件，在模型其他与外界接触表面施加自然对流边界条件[21]。

4.3　确定电机热物参数

本研究中的电机为新型永磁多维电机，其理论额定电流为 1.2 A。组成该电机的主要材料包括组成电机定子铁心的硅钢片，定子绕组铜线，以及转子永磁体采用的钕铁硼[22-24]。各种材料的热特性参数如表 2 所示。

表 2　电机材料热物参数

Tab. 2　Thermal physical parameters of motor materials

材料	导热系数/(W(m·K)$^{-1}$)	比热容/(J·(kg·K)$^{-1}$)	密度/(kg·m^{-3})
硅钢片	23	448	7 750
铜	400	386	8 933
钕铁硼	10	350	8 300

5　仿真结果及分析

5.1　额定工作情况下温升情况

用 ANSYS WORKBENCH 软件对该新型永磁电机进行三维热仿真分析，设置环境温度和初始温度为 20 ℃，电机在无散热设备和自然对流换热条件下的换热系数为 12 W/(m^2·K)，额定工作状态下电机铜耗约为 48 W，铁耗约为 0.1 W。求解后，该电机局部热分布三维云图如图 4 所示，温度矢量图如图 5 所示。

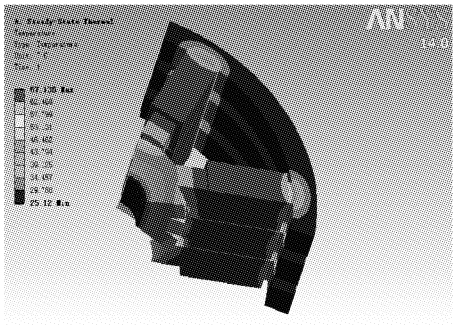


图 4　电机局部温度分布云图

Fig. 4　Part of the modal temperature distribution diagram

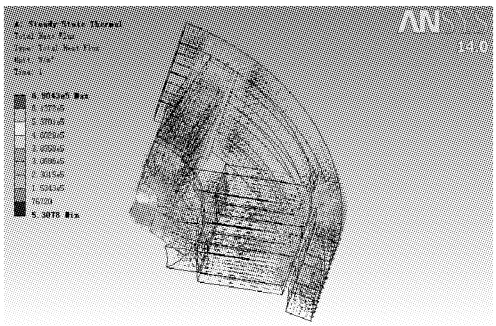


图 5　电机局部温度矢量图

Fig. 5　Part of the modal temperature vector diagram

从图 4、图 5 中可以直观的看出，该电机在正常工作不加散热装置的情况下最高温升达到了 67.1 ℃，最低温度从室温 20 ℃升高到 25.1 ℃。电机温升最高的部分为定子线圈，可见铜耗在该电机的生热因素中占主要作用。由于永磁体与定子铁芯间气隙较小，定子绕组的温升对转子永磁体的影响较大，使转子永磁体有一定的温升。

5.2　过载工作情况下温升情况

由于实际中电机的工作情况比较复杂，因此对电机在过载大电流时的生热情况进行分析十分重要。在与 4.1 节中外部环境相同的情况下，当电流增大到额定电流的 1.5 倍即 1.8 A 时，电机的铜耗增大到 108 W，铁耗为 0.1 W。求解后电机温度分布云图及温度矢量图如图 6 和图 7 所示。

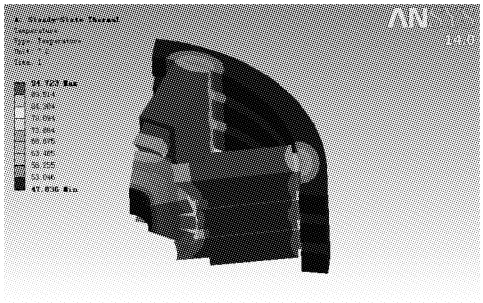


图 6　电机过载局部温度分布云图

Fig. 6　Part of the model overload temperature distribution diagram

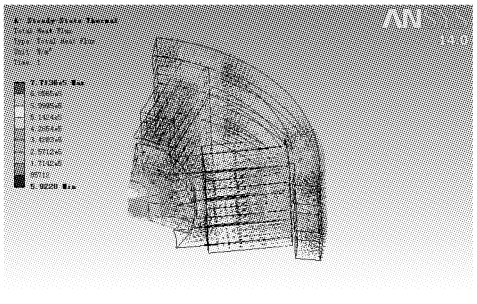


图 7　电机过载局部温度矢量图

Fig. 7　Part of the model overload temperature vector diagram

分析图6和图7可知，电机在1.5倍额定电流情况下工作，同样不加散热装置的情况下电机最高温升达到94.7 ℃，最低温度为47.8 ℃，且发热主要集中在电机的绕组线圈处，可见在过载工作情况下引起电机温升的主要因素依然为铜耗，转子永磁体的温升同样比较高。

5.3 转子永磁体温升分析

由于永磁体不同温度下会表现出不同的磁性，温度过高时永磁体的磁性会减弱甚至发生不可逆的退磁现象，因此分析电机永磁转子在不同的工作情况下的温升情况对电机的稳定性及安全性而言至关重要。图8中记录了电机在不同工作电流情况下永磁体的最高温升。从图中可以看出电机在其额定电流1.2 A到3 A工作时其转子永磁体的最高温度由55.2 ℃升高到184.3 ℃，可见该电机在大电流工作情况下其永磁转子温升较为严重，可能会对转子永磁体造成损害影响到电机工作稳定性。

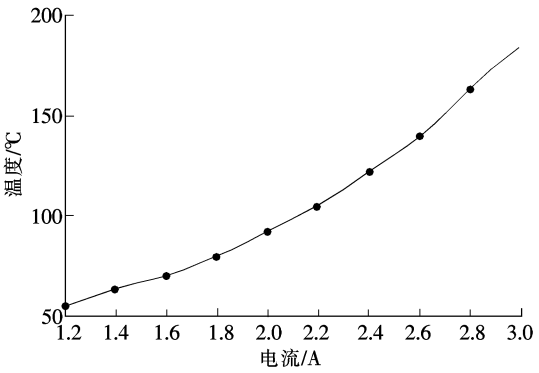


图8 不同电流条件下转子永磁体温升图

Fig. 8 Curve of the temperature of PM rotor with respect to different currents

6 结 论

本文利用有限元仿真软件对永磁转子偏转式三自由度电机的发热情况进行分析，探讨了该电机在额定工作状态下及过载大电流工作状态下的生热情况，通过建立不同加载条件下的温度场计算模型，求解出了具体的计算结果。计算结果表明，电机在额定工作情况下内部最高温升为67.1 ℃，在安全工作温度范围内，从而验证了该模型设计的合理性；定子线圈为该电机主要发热源表明铜耗在该电机损耗中占主要地位，电机体积较小铁耗生热并不明显；且由于转子永磁体与定子铁心距离较近，电机在大电流工作情况下可能会导致转子永磁体温升过高，影响电机工作的稳定性。热分析结果为电机进一步的设计与优化提供了依据和参考，在此基础上驱动和控制策略的设计是下一步的工作内容。

参考文献/References：

[1] 刘娇，黄守道，成本全，等. 循环油冷却永磁同步电动机的温度场分析[J]. 微电机，2010，43(5)：10-12.
LIU Jiao, HUANG Shoudao, CHENG Benquan, et al. Analysis of temperature field in a cycling oil cooled permanent magnet synchronous motor[J]. Micromotors, 2010, 43(5): 10-12.

[2] 周海栋，张艳伟，王博超，等. 基于ANSYS Workbench的风力机流固耦合分析[J]. 河北工业科技，2013，30(5)：314-318.
ZHOU Haidong, ZHANG Yanwei, WANG Bochao, et al. Fluid-solid coupling analysis of wind turbine blade based on ANSYS Workbench [J]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology, 2013, 30(5): 314-318.

[3] 赵远征，李斌，刘志忠，等. 三相12/8极高压开关磁阻电机设计及仿真[J]. 河北工业科技，2014，31(1)：20-23.
ZHAO Yuanzheng, LI Bin, LIU Zhizhong, et al. Design and simulation of extra-high voltage switched reluctance motor with three-phase 12/8 poles [J]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology, 2014, 31(1): 20-23.

[4] GUO Youguang, ZHU Jianguo, WU Wei. Thermal analysis of soft magnetic composite motors using a hybrid model with distributed heat sources [J]. IEEE Transactions on Machines, 2005, 41(6): 2124-2128.

[5] 马少丽. 汽轮发电机定子三维温度场的有限元计算与分析[D]. 北京：华北电力大学，2006.
MA Shaoli. The Calculation and Analysis on Stator 3D Temperature Filed of Turbo-Generators by Finite Element Method[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2006.

[6] 丁文，周会军，鱼振民. 基于ANSYS的开关磁阻电机温度场分析[J]. 微电机，2005，38(5)：13-15.
DING Wen, ZHOU Huijun, YU Zhenmin. Analysis of temperature filed for switched reluctance motor based on ANSYS[J]. Micromotors, 2005, 38(5): 13-15.

[7] QU Fengbo, LI Zhipeng, CHENG Shukuang, et al. Calculation and simulation analysis on starting performance of the high-voltage line start PMSM[C]//IEEE International Conference on Computer Application and System Modeling. Taiyuan: IEEE, 2010: 198-202.

[8] 陶文栓. 数值传热学[M]. 西安：西安交通大学出版社，2006：5-19.
TAO Wenshuan. Numerical Heat Transfer[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2006: 5-19.

[9] 李伟力，陈婷婷，曲风波，等. 高压永磁同步电动机实心转子三维温度场分析[J]. 中国电机工程学报，2011，30(18)：55-60.

LI Weili, CHEN Tingting, QU Fengbo, et al. Analysis on solid rotor 3-D temperature field in high voltage PMSM[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 30(18): 55-60.

[10] GRABEZHNAYA V A. Heat-transfer degradation boundary in supercritical-pressure flow[J]. Atomic Energy, 2006, 101(4): 13.

[11] ALEKSEEV G V. Solvability of stationary boundary control problems for heat convection equations[J]. Siberian Mathematical Journal, 1998, 39(5): 27.

[12] 王水发，陈德为. 基于 ANSYS 的异步电动机二维稳态温度场分析[J]. 电气传动自动化，2011，33(2)：23-26.
WANG Shuifa, CHEN Dewei. Analysis of two-dimensional steady temperature field of asynchronous motor based on ANSYS[J]. Electric Drive Automation, 2011, 33(2): 23-26.

[13] 李青青，黄勤，杨立，等. 无刷力矩电动机电磁场-温度场耦合仿真与分析[J]. 微特电机，2013，41(8)：30-32.
LI Qingqing, HUANG Qin, YANG Li, et al. Coupling analysis and simulation of electromagnetic field and temperature field for brushless torque motors[J]. Small & Special Electrical Machines, 2013, 41(8): 30-32.

[14] 李伟力，李守法，谢颖，等. 感应电动机定转子全域温度场数值计算及相关因素敏感性分析[J]. 中国电机工程学报，2007，27(24)：85-91.
LI Weili, LI Shoufa, XIE Ying, et al. Stator-rotor coupled thermal field numerical calculation of induction motors and correlated factors sensitivity analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(24): 85-91.

[15] 马杰，于奇志. 用有限元法计算永磁同步电动机的转子损耗[J]. 防爆电机，2003(6)：8-10.
MA Jie, YU Qizhi. FEM calculation rotor losses in PM synchronous motor[J]. Explosion-proof Electric Machine, 2003(6): 8-10.

[16] 邹继斌，张洪亮，江善林，等. 电磁稳态条件下的力矩电机三维暂态温度场分析[J]. 中国电机工程学报，2007，27(21)：66-70.
ZOU Jibin, ZHANG Hongliang, JIANG Shanlin, et al. Analysis of 3D transient temperature field for torque motor in the state of steady electromagnetic field[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(21): 66-70.

[17] WANG Qunjing, LI Zheng, NI Youyuan, et al. Magnetic field computation of a PM spherical stepper motor using integral equation method[J]. IEEE Tansactions on Magnetics, 2006, 42(4): 731-734.

[18] 夏正泽，刘慧娟. 异步牵引电动机定子温度场的计算与分析[J]. 微特电机，2009(4)：22-25.
XIA Zhengze, LIU Huijuan. Analysis and calculation of the stator temperature field of asynchronous traction motors[J]. Small & Special Electrical Machines, 2009(4): 22-25.

[19] 温志伟，顾国彪. 实心磁极同步电动机转子温度场计算[J]. 大电机技术，2005(2)：1-5.
WEN Zhiwei, GU Guobiao. Calculation of rotor temperature field for solid pole synchronous [J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2005(2): 1-5.

[20] ALEKSEEV G V. Solvability of stationary boundary control problems for heat convection equations[J]. Siberian Mathematical Journal, 1998, 39(5): 27.

[21] KRAL C, HABETLER T G, HARLEY R G, et al. Rotor temperature estimation of squirrel-cage induction motors by means of a combined scheme of parameter estimation and a thermal equivalent model[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2004, 40(4): 1049-1057.

[22] JUNGGI L, KWANGHEE N, SEOHO C. Loss minimizing control of PMSM with the use of polynomial approximations[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(4): 1071-1082.

[23] RIOUL M. A Thermo hydraulic modeling for the stator bars of large turbo generators: development, validation by laboratory and on site tests [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1997, 12(1): 1-9.

[24] 李争，郭智虎，张玥. 新型永磁转子偏转式三自由度电机磁场特性分析[J]. 河北科技大学学报，2012，33(5)：422-428.
LI Zheng, GUO Zhihu, ZHANG Yue. Magnetic field analysis of a novel 3-DOF deflection type PM motor[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2012, 33(5): 422-428.