

大容量高速永磁电机热流场仿真 及参数敏感性分析^{*}

刘 阳, 余中军, 张贤彪

(海军工程大学 舰船综合电力技术国防科技重点实验室, 湖北 武汉 430033)

摘 要: 建立电机三维热流场模型, 基于流固耦合法, 计算大容量高速永磁电机温度场。通过样机温升试验, 验证了仿真模型正确性。在此基础上选取导热系数这一影响温度场重要因素作为研究对象, 通过控制其在合理范围变化, 分析电机温度场对各部件导热系数的敏感性程度。结果为以后高速永磁电机温度场仿真中导热系数的确定提供了参考。

关键词: 高速永磁电机; 温度场; 导热系数; 敏感性分析

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2018)03-0103-05

Analysis of Thermal and Flow Fields for Large-Capacity High Speed Permanent Magnet Machine and Parameters Sensitivity Analysis^{*}

LIU Yang, YU Zhongjun, ZHANG Xianbiao

(National Key Laboratory of Science and Technology on Vessel Integrated Power System,
Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: The 3D temperature model of the machine was established, and fluid-solid coupling method was employed to analyze the field. The experimental results have validated the temperature predictions. Based on the proposed thermal field model, some work is given to the analysis of thermal sensitivity to the thermal conductivity, which could help optimum design of high speed permanent magnet machine in future applications.

Key words: high speed permanent magnet machine; thermal field; thermal conductivity; sensitivity analysis

0 引 言

高速永磁电机向着具有强耦合、多约束与非线性时变等特征的高功率密度方向发展。其重量、体积远小于同容量的中低速电机, 并可与高速原动机直接连接, 因此可大幅降低电力系统的重量、体积和振动噪声。然而高速永磁电机的温升问题一直是制约其发展的瓶颈之一^[1]。首先, 高速电机以额定转速运行时, 气隙中存在大量时间谐波和空间谐波^[2], 且高速永磁电机供电频率比普通电机高出约 10 倍, 因此基波和谐波频率较高, 导致定子和转子中产生大量的高频铁耗、高频铜耗和涡流损耗, 同时转子高速旋转产生的风摩损耗也是普通电机的

几十倍^[3]。另一方面, 高速永磁电机体积小、散热条件差, 布置冷却系统的空间有限, 且转子永磁体外必须嵌套高强度合金钢或碳纤维材料加以保护^[4], 更容易造成转子局部高温。

综上, 高速永磁电机功率密度大, 温度场计算较一般电机更为复杂。其热流场的影响因素间耦合程度高, 相互约束强, 计算难度大。计算高速永磁电机热流场需要对各个影响因素进行精细化分析, 但是在电机温度场与流体场分析方面, 目前导热系数、对流换热系数等关键参数通常采用经验方法近似, 距电机温升的精确计算仍存在一定差距^[5]。因此研究热物性参数对电机温度场计算的影响具有实际意义。

^{*} 基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2013CB035601); 国家自然科学基金项目(51690181)

作者简介: 刘 阳(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电机冷却技术。

本文以某型大容量高速为研究对象,进行三维热流场仿真。以此为基础,开展热物性参数对电机温度场的影响研究,并针对在合理范围内变化的导热系数对电机散热的影响敏感性分析,得到不同部件热物性参数对电机散热的贡献度分析,形成基于材料导热系数的电机冷却设计指导。

1 温度场计算基础

1.1 热传导

在电机定子绕组直线段中,铜耗在定子槽内主要通过热传导的方式传递,传热路径为:铜绕组→绝缘层→定子铁心。导热问题的温度场完整数学描写由导热微分方程和相应的定解条件构成,傅里叶定律和能量守恒方程式是建立导热微分方程的基础。假定所研究物体具有各项同性^[6],有均匀内热源,在笛卡尔坐标系下的数学描述为

$$\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) + \dot{\Phi} \quad (1)$$

式中: ρ ——微元体的密度;

c ——比热;

$\dot{\Phi}$ ——生热率;

τ ——时间。

导热微分方程是描写导热过程共性的数学表达式。导热问题的求解实质就是导热微分方程的求解。

1.2 热对流

对流换热可分为自然对流和强迫式对流。一般空冷电机中,定子端部绕组与转子表面属于强迫式对流换热,机壳外表面属于自然对流换热。对流问题完整的数学描写包括对流传热微分方程组和其定解条件^[7]。对于不可压缩、常物性、无内热源的二维问题,对流传热微分方程组为

$$\begin{cases} \rho c_p \left(\frac{\partial t}{\partial \tau} + u \frac{\partial t}{\partial x} + v \frac{\partial t}{\partial y} \right) = \lambda \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right) \\ \rho \left(\frac{\partial u}{\partial \tau} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = F_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \eta \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \\ \rho \left(\frac{\partial v}{\partial \tau} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = F_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \eta \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

该方程组的定解条件包括初始时刻的条件及边界上与速度、压力及温度等有关的条件。

1.3 热辐射

热辐射通过电磁波来传递能量,是辐射和吸收过程的综合结果^[8]。辐射热流量可采用 Stefan-Boltzmann 定律的经验修正公式:

$$\Phi = \varepsilon A \delta T^4 \quad (3)$$

式中: ε ——物体的发射率;

A ——辐射表面积;

δ ——Stefan-Boltzmann 常量;

T ——热力学温度。

因为电机中热量以热辐射形式传递部分远小于热传导和热对流形式,所以在电机温升计算中可以忽略^[9]。

2 热流场计算

2.1 建立模型

研究选取的高速永磁电机采用空冷加定子水冷机套的冷却结构。冷却空气进出口分别布置在轴伸端和非伸端上方,空气从入口进入后被定子槽轴向通风沟、气隙和转子轴向通风沟分为三路,后于出口端汇集并流出,如图 1 所示。水冷机套位于定子铁心外部。定子内布置两组环形直流励磁绕组,由导磁套筒实现磁路链接。转子全永磁

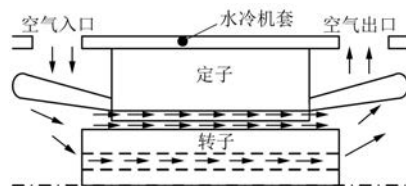


图1 风路截面图

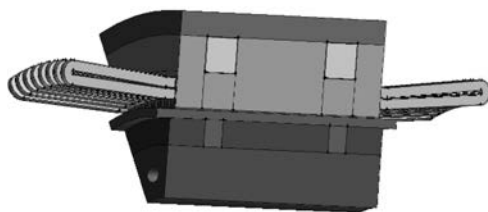


图2 求解域模型

部分位于电机中部,辅助励磁部分位于电机两侧。转子最外层使用碳纤维材料护套加以固定支撑。根据电机对称性,模型轴向取实际电机结构的1/12,如图2所示。

2.2 设置与简化

为合理简化求解过程,做如下设置。

(1) 流体场设置方面:高速电机中空气雷诺数 $Re>2\ 300$,将流体场设置为湍流模型进行求解;忽略重力与浮力对电机内流体流动的影响;设置电机内流体为定常流动,在求解方程中不含有时间项^[10];流体在电机内流动的马赫数很小,设置流体为不可压缩黏性流体^[11]。

(2) 样机额定转速达 $10\ 000\ \text{rad/min}$ 以上,故将气隙周向两侧对称面设置为周期性对称面,模拟转子高速转动。

(3) 忽略匝间绝缘,将定子绕组和励磁线圈中的电磁线等效成位于槽中心的“铜条”;将定子绕组绝缘漆、定子槽壁绝缘漆和槽内的间隙空气等效为均匀分布在等效绕组四周的绝缘层,如图 3 所示。

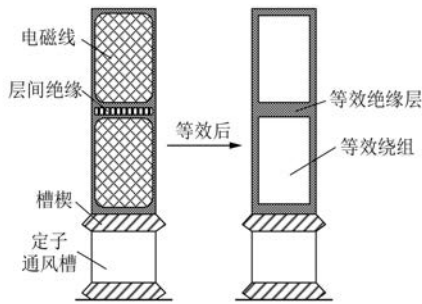


图 3 等效绝缘层

(4) 因为无法量化端部云母带绑扎、垫块等结构,故忽略其影响。端部绕组建模时,将成型线圈做拉直处理,但仍将上翘角度和压弯圆角保留,如图 4 所示。



图 4 等效绕组

(5) 假设水冷机套与导磁套筒间不存在接触热阻。水冷机套采用螺旋水道,水道截面为矩形,槽内设置肋板以提高流体紊流程度,增强对流换热效果,如图 5 所示。为降低热流场耦合程度,将



图 5 水冷机套

水冷机套简化成带有恒定壁温与对流换热系数的换热壁面。其换热规律满足热平衡式:

$$h_w A \Delta t_w = q_w c_p \Delta t_l \tag{4}$$

- 式中: h_w ——表面平均换热系数;
 A ——换热面积;
 Δt_w ——流体与换热壁面温差;
 q_w ——流体质量流量;
 c_p ——流体比热容;
 Δt_l ——水冷机壳进出口冷却水温差。

2.3 计算结果

应用 Fluent 仿真平台,选择标准 $k-\varepsilon$ 湍流计算模型,所有网格节点的求解采用分离、隐式离散方程。其中压力与速度方程采用 SIMPLE 算法进行耦合计算,所有计算均采用 2 阶迎风方程。经过反复迭代得到最终计算结果,将结果对比电机温升试验数据。计算输入边界条件和计算结果见表 1 和表 2。

表 1 温度场输入

转速/ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	铜耗/ kW	铁耗 /kW	励磁损耗/ kW	风磨损耗/ kW	涡流损耗/ kW
8 500	9.53	15.5	2.56	27.8	0.59

由表 2 可知,仿真值与实测值误差在 10% 内,满足温度场计算误差要求,证明该有限元仿真模型的准确性。

表 2 温度场计算结果

温度测点	实测值/ $^{\circ}\text{C}$	计算值/ $^{\circ}\text{C}$	误差/%
铁心(测点 1)	130.2	136.7	4.99
铁心(测点 2)	136.7	142.5	4.24
端部绕组(伸端)	60.4	60.5	0.17
端部绕组(非伸端)	78.5	82.6	5.22
进出口风温差	52.8	53.3	0.95

3 敏感性分析

3.1 铁心导热系数对温度场影响

分别取铁心径向与轴向导热系数为上述仿真输入值的 k_{xy} 倍与 k_z 倍, 对定子绕组、定子铁心、永磁体、护套和励磁绕组的最高温度和平均温度分布进行研究。

图 6 给出了 5 个部件温度变化趋势。从图 6 中可知: 温度对径向导热系数影响的敏感程度高于轴向导热系数。其中定子铁心、定子绕组及励磁绕组受其影响较大。

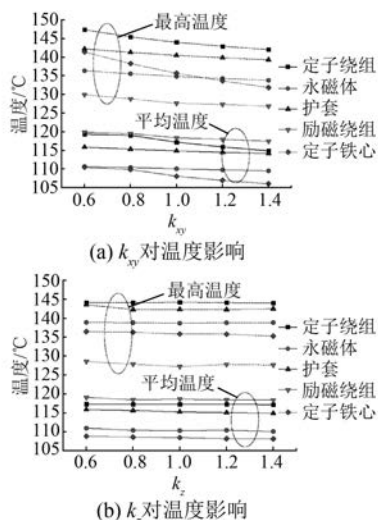


图 6 铁心导热系数对温度影响

3.2 绝缘层导热系数对温度场影响

取等效绝缘层导热系数为原仿真输入值的 k_i 倍, 对定子绕组、定子铁心、永磁体、护套和励磁绕组的最高温度和平均温度分布进行研究。

图 7 为 5 个部件随绝缘层导热系数变化图。从图 7 中可知: 温度计算结果对绝缘层导热系数敏感程度很高。其中励磁绕组温度敏感性最高, 原因是励磁绕组采用散开线加浸渍绝缘漆形式,

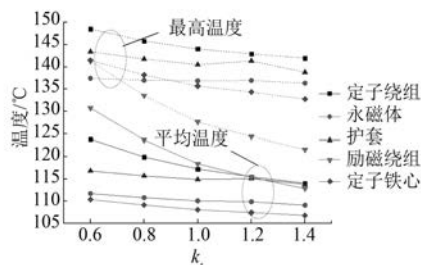


图 7 绝缘层导热系数对温度影响

且建模时等效绝缘层厚度大于等效绕组绝缘层, 所以励磁绕组温度受绝缘层影响最大。

3.3 永磁体导热系数对温度场影响

取永磁体导热系数为原仿真输入值的 k_{pm} 倍, 对定子绕组、定子铁心、永磁体、护套和励磁绕组的最高温度和平均温度分布进行研究。

图 8 给出了 5 个部件随永磁体导热系数变化图。从图 8 中可知: 永磁体导热系数只对护套和永磁体的最高温度有影响, 定子侧温度受其影响很小。

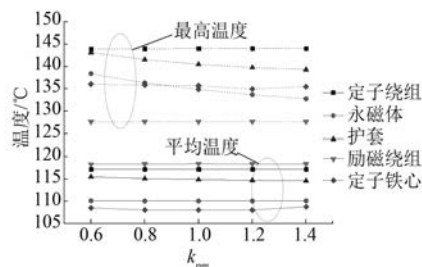


图 8 永磁体导热系数对温度影响

3.4 碳纤维护套导热系数对温度场影响

取护套导热系数为原仿真输入值得的 k_e 倍, 对定子绕组、定子铁心、永磁体、护套和励磁绕组的最高温度和平均温度分布进行研究。

图 9 给出了 5 个部件随护套导热系数变化图。从图 9 可知: 转子侧温度对护套导热系数的敏感性程度高, 尤其是永磁体的最高温度受影响最大。原因是虽然转子侧自身损耗产热较少, 但是碳纤维护套的导热系数较低, 使热量无法散发; 加之护套表面较高的风磨损耗, 加剧了永磁体局部高温。

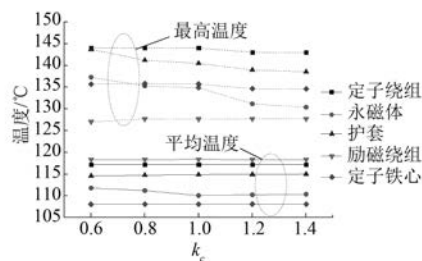


图 9 护套导热系数对温度影响

4 结 语

通过对样机在 8 500 rad/min 转速下的稳态温度场计算并分析了电机温度场对定子铁心、等

效绝缘层、永磁体和护套的导热系数的敏感性,得到了以下结论:

(1) 通过将仿真计算结果与试验数据对比,证明了基于简化假设建立的仿真模型对高速永磁电机是适用的。

(2) 铁心的导热系数和绝缘层的导热系数对电机温度分布影响明显,可通过改变其导热性能以降低电机温升。

(3) 电机温度场对永磁体导热系数的敏感性程度不高,可在较宽的范围内取用永磁体导热系数。

(4) 护套对电机转子侧温度分布有较大的影响,虽然转子侧自身损耗产热较少,但是碳纤维护套的导热系数较低,使热量积聚。进一步提高护套的导热性能有助于降低高速永磁电机转子侧的温升。

【参考文献】

- [1] FAN J X, ZHANG C N, WANG Z F, et al. Thermal analysis of water cooled surface mount permanent magnet electric motor for electric vehicle [C] // Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2010 International Conference on IEEE, 2010: 1024-1028.
- [2] 丁舜年.大型电机的发热与冷却[M].北京:科学出版社,1992.
- [3] 王淑旺,江曼,朱标龙,等.车用变频调速水冷永磁同步电机三维温度场分析[J].电机与控制应用, 2016,43(2): 55-59.
- [4] WANG R J, HEYNS G C. Thermal analysis of a water - cooled interior permanent magnet traction machine [C] // Industrial Technology (ICIT), 2013 IEEE International Conference on IEEE, 2013: 416-421.
- [5] NERG J, RILLA M, PYRHONEN J. Thermal analysis of radial-flux electrical machines with a high power density [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(10): 3543-3554.
- [6] 杨世铭,陶文铨.传热学[M].4版.北京:高等教育出版社,2006.
- [7] 韩力,焦晓艳,李景灿,等.无刷双馈电机全域多工况温度场的分析与计算[J].电机与控制学报, 2013,17(5): 1-8.
- [8] 刘秀杰,杨平,陈岩.发电机定子绕组温度的计算方法及评价[J].电机与控制应用, 2014,41(1): 19-22.
- [9] 路义萍,汤璐,刘涔钰,等.某凸极同步电动机转子三维温度场计算与分析[J].电机与控制学报, 2013,17(2): 72-77.
- [10] 鲍里先科,丹科,亚科夫列夫,等.电机中的空气动力学与热传递[M].魏书慈,邱建甫,译.北京:机械工业出版社,1985.
- [11] 李伟力,丁树业,靳慧勇.基于耦合场的大型同步发电机定子温度场的数值计算[J].中国电机工程学报, 2005,25(13): 129-134.

收稿日期: 2017 -07 -31

(上接第 102 页)

- [15] WANG P, GUO R, YUAN W. Fatigue life analysis of front axle of engineering vehicle at random vibration based on numerical simulation load spectrum [J]. Construction Machinery & Equipment, 2013, 44(10): 39-42.
- [16] GALEA M. High performance, direct drive machines for aerospace applications [D]. Nottingham: University of Nottingham, 2013.
- [17] FARRELL P E, MADDISON J R. Conservative interpolation between volume meshes by local Galerkin projection [J]. Comp Methods Appl Mech Engrg, 2011(200): 89-100.
- [18] 刘志全,李新立,遇今.长寿命航天器机构的加速寿命试验方法[J].中国空间科学技术, 2008, 28(4): 65-71.
- [19] DOSSANTOS F L M, ANTHONIS J, NACLERIO F, et al. Multiphysics NVH modeling: Integrated simulation of a switched reluctance motor drivetrain for an electrical vehicle [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(1): 469-476.
- [20] 赵丽娟,孙晓娜,张佃龙.掘进机铲板有限元疲劳分析[J].机械设计与研究, 2012, 28(5): 120-122, 126.

收稿日期: 2017 -08 -07