

Temperature Field Analysis of Household Permanent Magnet Synchronous Motor Based on ANSYS

Bingyi Zhang¹, Jian Jiao¹, Guihong Feng¹, Hui Wang²

¹Shenyang University of Technology, Shenyang

²TBEA Shenyang Transformer Group Co., Ltd., Shenyang

Email: 420898062@qq.com

Received: Dec. 12th, 2012; revised: Dec. 20th, 2012; accepted: Dec. 30th, 2012

Abstract: Utilizing ANSYS software, we can build models of permanent magnet motor in steady state operation according to the theory of heat transfer. With household 1 kw air-cooled permanent magnet synchronous motor as an example, through finite element method to calculate the steady temperature field and electromagnetic loss of the motor. For the load steady state temperature rise experiment of the motor, the simulation results and experimental results are basically the same, which account for that method adopted for the motor design and analysis in the motor thermal field analysis is of certain valuable for engineering application.

Keywords: Permanent Magnet Motor; Temperature Field; Electromagnetic Loss

基于 ANSYS 的家电用永磁同步电动机温度场分析

张炳义¹, 矫健¹, 冯桂宏¹, 王晖²

¹沈阳工业大学, 沈阳

²特变电工沈阳变压器集团有限公司, 沈阳

Email: 420898062@qq.com

收稿日期: 2012 年 12 月 12 日; 修回日期: 2012 年 12 月 20 日; 录用日期: 2012 年 12 月 30 日

摘要: 本文根据传热学理论利用 ANSYS 软件建立了永磁同步电机稳态运行条件下温度场的计算模型, 并以某家电用 1 kw 空气自冷永磁同步电动机为例应用有限元法计算了电磁损耗及稳态温度场分布情况。对电机进行负载稳态温升实验, 仿真结果和实验结果基本一致, 说明本文在电机热场分析中采取的方法对于电机设计和热分析具有一定的工程应用价值, 同时证明所设计的电机安全合理。

关键词: 永磁电机; 温度场; 电磁损耗

1. 引言

永磁同步电机相对其他电机具有运行可靠, 结构相对简单, 运行效率高等诸多优势, 近年来, 正逐渐应用于家电领域。家电用永磁电机要求降低制造成本, 减小电机体积, 功率密度高, 随之而来的温升问题成为影响家用永磁电机安全使用的重要因素。温升过高会影响其运行性能, 使耐热能力薄弱的绝缘材料寿命缩短。所以, 在电机设计和分析中了解其发热情况, 准确地计算电机温度场分布问题具有实际意义。

对电机温升的研究已经取得一定的成果, 可采用等效热网络法计算永磁电机温升^[1,2], 传统电机经验公式法亦可估算温度^[3,4], 或将热路法应用于电机内部热交换和冷却空气流动的分析^[5]。然而, 由于电机结构散热条件等复杂因素给温度的计算带来一定的困难, 而传统温升研究大多针对特殊工况应用, 如机床用直流无刷电机温升研究^[6,7], 大型电机定子绕组温度^[8,9], 对家用小型永磁同步电机涉及较少, 对温度场的分析多数仅从整体考虑, 计算结果为平均值, 不能准确形

象的反应电机内部温度分布情况。

本文在前人工作基础上,针对小型家用永磁同步电机,利用 ANSYS 有限元法研究电机温度场,通过其后处理来仿真计算稳态温升,借助仿真云图更加形象准确地了解电机的温度情况。

2. 电机热源与散热源

热力学中的热量传递主要有三种形式:导热、对流和辐射。永磁电机的热源通常很复杂,本文针对的某家电用 1 kw 永磁同步电动机采用自然冷却方式的情况,电机系统温升较小,温度较低,辐射散失的热量较小,故不考虑辐射;其散热途径主要是通过电机外壳的自然对流换热来实现,另外定、转子之间通过气隙空气的强制对流交换热量。将电机的主要热源设定为电机定子绕组,定子铁耗。

2.1. 电机内部热传递

传热是由于温差引起的能量转移。热传导方程建立在热传导定律和能量守恒原理的基础上,近代研究电机的温度计算以稳态运行为主。稳定状态下,由傅里叶方程推导的电机温度分布的时间函数 $T(x, y, z)$ 方程如下

$$\lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q_v = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

稳态导热方程建立物体温度与空间的关系,依据特定存在的边界条件,可求出满足实际工程边界的特解,对实际工程产生现实指导意义。

2.2. 定子各部分损耗计算

定子绕组通常是电机的主要热源,采用比较符合实际的电枢绕组时变热源加载方式,以及引入由肌肤效应与股线间环流所导致的附加热源的影响,经计算设定定子绕组平均生热率为 $530,000 \text{ w/m}^3$ 。计算各部位损耗对应的单位生热率。对于定子来说,轭部和绕组的发热强度是不同的,其生热率为

$$W = P_e / V \quad (2)$$

式中, W 为生热率(w/m^3); P_e 为热源损耗值, V 为热源体积(m^3)。

进行铁耗与转子涡流损耗分析。电机工作时,定子铁芯中的磁通密度是非正弦、非线性的,并且各处

磁密不同,而铁耗又与磁密幅值呈非线性关系,对于此类饱和铁耗的分析计算是比较困难的。本文由 ANSOFT 有限元电磁场仿真软件计算,对定子铁芯材料设置电导率,输入 B-P 铁损曲线等。

建立永磁电机模型之后,对永磁体设置电导率、(set eddy effects)、(零电流),求解(solid loss)的方法来求解涡流损耗。

2.3. 导热系数的确定

由于永磁电机内部结构复杂,在计算稳态温度场时要先进行电机各部件传热煤质导热系数的赋值,导热系数的确定见表 1。需要注意的是,导热系数还与材料的温度有关,因此在实际应用时还是根据实验资料较为可靠,并根据导热系数与温度的关系曲线加以修正。

2.4. 散热系数计算

进行电机温度场计算时,涉及到定子表面的散热系数等边界条件。定子机壳转子表面的散热系数为

$$\alpha_n = \frac{1 + 0.25V_n}{450} * 10^4 \quad (3)$$

式中: V_n 为强制风冷气体介质的流速,自然冷却时 $\alpha = 22 \text{ w/m}^2 \cdot \text{K}$ 。

定子内圆散热系数较难计算,实用公式为

$$\alpha = 28(1 + \omega_\delta^{0.5}) \quad (4)$$

其中 α_δ 表面传热系数 [$\text{w}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$], ω_δ 为气隙平均风速,取 $\omega_\delta \approx 0.5U_2$, U_2 为转子圆周速度。

2.5. 基本假设

为了方便有限元计算和 ANSYS 温度场的分析,永磁低速力矩电机求解域的基本假设如下:

Table 1. Thermal conductivities of motor materials
表 1. 电机各部分材料导热系数

| 部件名称 | 材料名称 | 导热系数 |
|------|-------|-------|
| 铁芯叠片 | DW315 | 40 |
| 绕组 | 铜线 | 380 |
| 永磁体 | 钕铁硼 | 0.15 |
| 机壳 | 铝合金 | 160 |
| 轴 | 不锈钢 | 17 |
| 气隙 | 空气 | 0.025 |

- 1) 在稳态中不考虑瞬态温度影响;
- 2) 忽略端部绕组的发热产生传导的影响, 同时将整个整体机壳和气隙作为散热源;
- 3) 忽略轴部的热量散失和槽内气隙的影响;
- 4) 由于轴向无风冷系统, 将气隙温度传播方式处理为热传导。

3. 基于 ANSYS 永磁电机温度场仿真

根据上述分析, 本文对一台 1 kW 家电用永磁同步电动机进行了计算, 分析流程如图 1 所示。

3.1. 永磁电机模型建立

如图 2 和 3 所示, 在 ANSYS 的 steady-state-thermal 模块中绘制电机定转子三维模型。

3.2. 载荷添加

借助电机电磁场仿真计算, 确定各发热源的损耗值。利用公式(2)、(3)确定散热系数, 结合电机材料的相关物理属性, 即可对永磁电机的温度场模型进行剖分(图 4)和加载求解(图 5)。

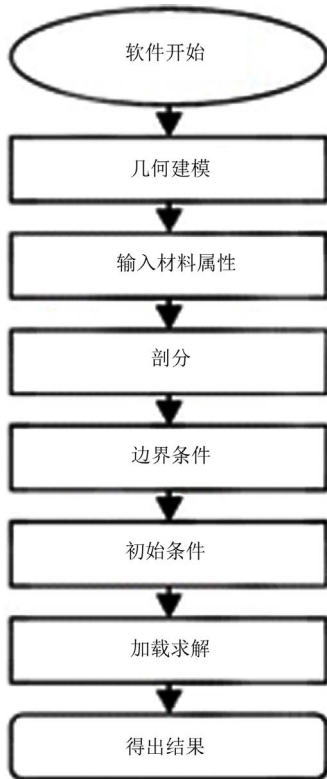


Figure 1. Thermal analysis flow chart
图 1. 热分析流程图

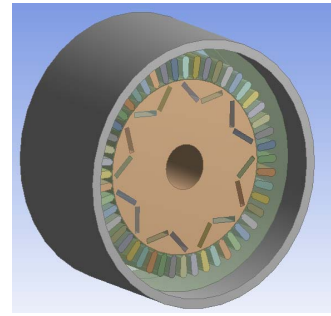


Figure 2. Three-dimensional model of motor
图 2. 电机三维模型

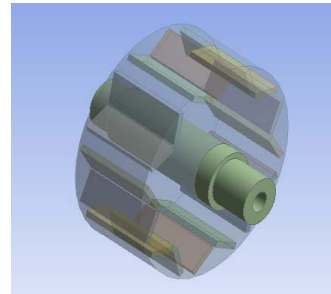


Figure 3. Three-dimensional model of rotor
图 3. 转子三维图

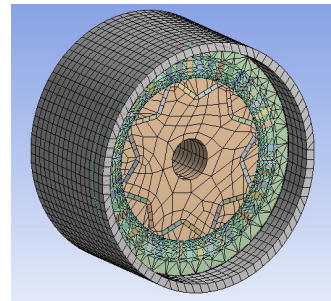


Figure 4. Motor division figure
图 4. 电机剖分图

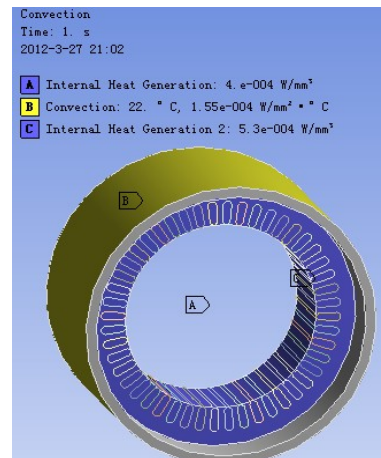


Figure 5. Motor heat load
图 5. 定子热源加载

4. 电磁仿真结果

本文针对 1 kw 家电用永磁电机温度场进行研究。采用有限元法计算分析定子铁耗结果，见图 6，经过公式(2)折算，定子铁芯生热率为 20,000 w/m³。永磁电机转子涡流损耗仿真计算得永磁体损耗有效值为 14 w，生热率为 50,000 w/m³，见图 7。

添加仿真折算所得生热率和散热率，利用 ANSYS 后处理模块得稳态温度场仿真结果如图 8 和 9 所示。

5. 电机温升实验

图 10 为洗衣机用永磁电机样机，取代原有驱动系统，利用变频设备和测温仪进行电机温升实验。

电机样机施加额定负载，进行温升测量实验，测量电机表面，定子绕组等部位温度，得到表 2 数据和图 11 温升曲线。实验表明定子最高温度为定子线圈绕组，电机温度运行 60 分钟以后温度稳定为 60℃左右，转子温升较低。这是因为绕组绝缘及绝缘介质的导热系数很小，而线圈绕组为本样机定子主要的电磁损耗发热源。通过对比，电机内部各部位温度分布规律与仿真结果趋势基本一致。考虑到家电用永磁电机每次使用时间较短，本实验所测时间范围内的电机稳态温升可满足用户正常安全使用。

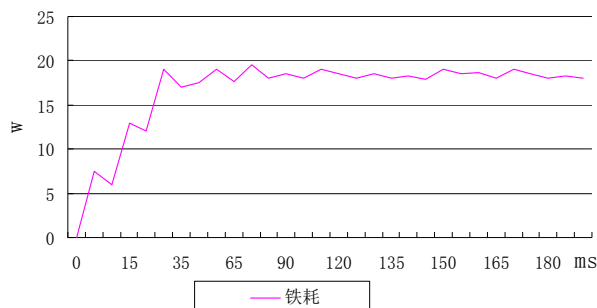


Figure 6. Curve: stator iron loss
图 6. 定子铁耗曲线

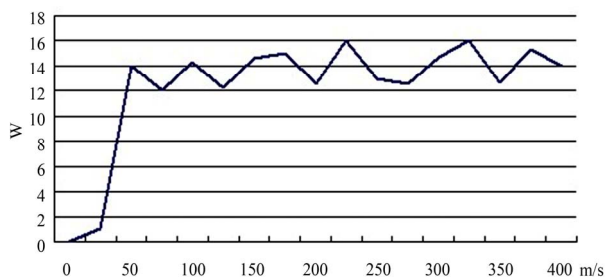


Figure 7. Curve: rotor eddy loss
图 7. 转子涡流损耗曲线

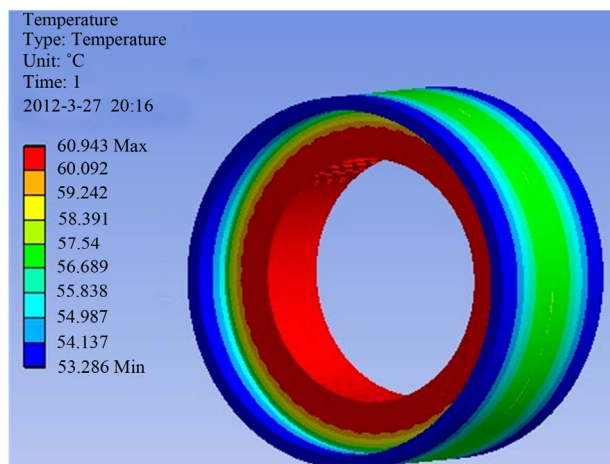


Figure 8. Temperature distribution of stator
图 8. 定子温度场云图

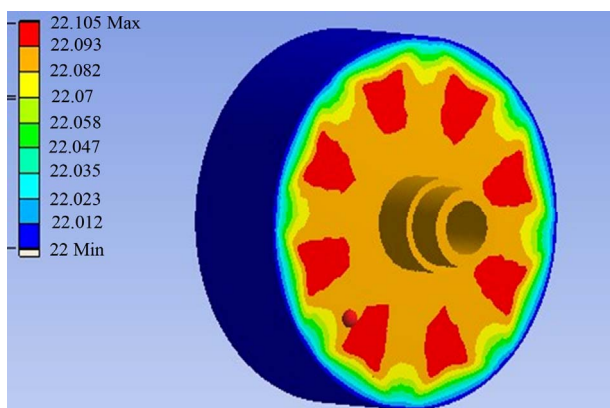


Figure 9. Temperature distribution of rotor
图 9. 转子温度场云图



Figure 10. Household permanent magnet motor prototype
图 10. 家用永磁电机样机

Table 2. Data of experimental and calculated temperature
表 2. 电机温度实测值与计算值

| 区域名称 | 实测平均温度/°C | 计算温度/°C |
|------|-----------|---------|
| 机壳 | 47 | 52 |
| 定子绕组 | 59 | 61 |
| 永磁体 | 38 | 32 |
| 转轴 | 33 | 28 |

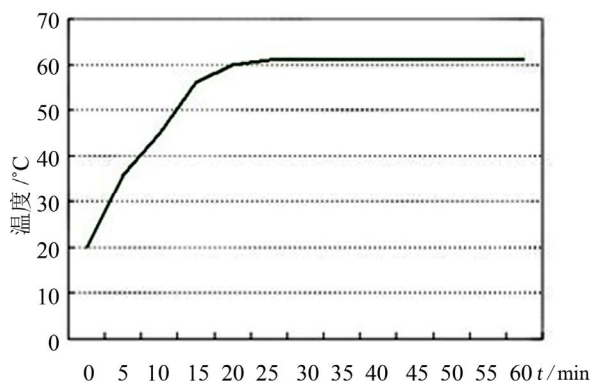


Figure 11. Curve: temperature of stator winding
图 11. 电机绕组温升测量曲线

6. 结论

利用本文方法研究家电用 1 kw 永磁同步电动机温升, 其温度场仿真与实测结果基本吻合, 说明该方

法能够满足对永磁同步电动机设计时稳态温度的预测要求。所设计的空气自冷却永磁同步电动机温升在安全合理范围。应用有限元法分析电机电磁性能并得到电机的内部各区域温升云图, 验证了电机设计的合理性及可靠性。这为今后永磁电动机电磁分析和电机温升的研究提供了基础。

参考文献 (References)

- [1] 杨菲. 永磁电机温升计算及冷却系统设计[D]. 沈阳工业大学, 2007.
- [2] 江善林, 邹继斌, 张洪亮. 电梯曳引 PMSM 三维暂态温度场的数值计算与分析[J]. 电工技术学报, 2007, 22(10): 6-11.
- [3] 许明宇, 温嘉斌, 吴桂珍. 防爆型高功率密度电机温度场与流体场综合计算[J]. 防爆电机, 2008, 3: 21-24.
- [4] 靳廷船, 李伟力, 陈文彪. 感应电机运行时的定子温度场分析与计算[J]. 防爆电机, 2006, 2: 12-14.
- [5] 赵伟, 张洪亮, 李勇. 低速永磁力矩电机的三维温度场数值计算[D]. 哈尔滨工业大学.
- [6] 高彦骋, 刘卫国. 基于 Ansys 的 11 kW 无刷直流电动机温度场分析[J]. 微电机, 2008, 9: 5-7.
- [7] 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.
- [8] 张新波, 许承千. 电机三维温度场的综合分析[J]. 电工技术杂志, 2000, 3: 4-6.
- [9] Y. J. Zhang, J. J. Ruan. Calculation of temperature rise in air-cooled induction motors through thermal finite element analysis. IEEE Transactions on Magnetics, 2012, 48(2): 1047-1050.