

Research on the Temperature Field of Asynchronous Magnetic Coupling

Yanjun Ge, Yulong Jiang, Qi Xiao, Shuai Zhang, Yue Wang

Dalian Jiaotong University, Dalian Liaoning
Email: yulong35313@163.com

Received: Jan. 20th, 2015; accepted: Feb. 1st, 2015; published: Feb. 5th, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

In order to obtain the internal temperature rise of Asynchronous Magnetic Coupling (AMC) in working, the mathematical model is established based on the operational mechanism of AMC. The theoretical value of the temperature field of AMC is calculated by the variational principle and the finite element value of the temperature field is calculated by simulation of Ansoft and ANSYS Workbench. Finally, the actual temperature is measured by the experiment. The results show that the theoretical calculation and the finite element analysis result are as equivalent as those of measured value, proving the validity of the established AMC theoretical model.

Keywords

Magnetic Coupling, Temperature Field, Variational Principle, Finite Element Calculation

笼型转子异步磁力耦合器的温度场研究

葛研军, 姜玉龙, 肖奇, 张帅, 王玥

大连交通大学, 辽宁 大连
Email: yulong35313@163.com

收稿日期: 2015年1月20日; 录用日期: 2015年2月1日; 发布日期: 2015年2月5日

摘要

为获得笼型转子异步磁力耦合器(Asynchronous Magnetic Coupling, AMC)工作时的内部温升, 基于

AMC运行机理建立数理模型，通过变分原理计算出AMC温度场的理论值，并利用Ansoft及ANSYS Workbench联合仿真计算出AMC温度场的有限元值，并最终通过实验测出AMC的实际温度。结果表明：AMC理论计算及有限元分析结果与实测值相当，证明了所建AMC理论模型的正确性。

关键词

磁力耦合器，温度场，变分原理，有限元计算

1. 引言

笼型转子异步磁力耦合器(AMC)是一种新型磁力传动机构，主要由传动轴、鼠笼转子和永磁转子组成。AMC的内转子一般采用三相异步电机的鼠笼结构，鼠笼转子铁芯由两面绝缘的硅钢片组成，绕组为铸铝笼条[1][2]。当AMC中的笼型转子切割磁感线时，笼条中产生的涡流损耗将转化为热量，使其内部产生较大温升，而过高的温升将导致永磁体不可逆退磁，使AMC工作状态失效。

AMC工作原理与鼠笼型异步电机相似，因此可以采用与电机相同或相似的温度场分析方法。目前电机温度场的分析方法主要为集中热参数法、等效热路法和数值计算法[3][4]。集中热参数法采用叠加原理，即视电机系统温升为其内部所有发热元件温升的总和。等效热路法是根据传热学和电路理论以形成等效热路，并采用类似电路中的基尔霍夫定律计算出电机各部件的平均温升[5]。等效热路法能够准确描述电机的实际模型，物理意义明确，计算量相对较小，计算精度比集中热参数法高，但该方法不能计算电机内部任意指定部位的实际温升分布情况。

数值计算法是借助计算机求解场问题的近似计算方法。它运用离散的概念，将整个求解域离散成有限个子域，而每个子域内利用与偏微分方程等价的变分原理进行推导，最终归结为求解线性方程组问题。由于数值计算法可以很好地解决电机实际温升的分布问题[6][7]，因此本文采用数值计算法计算AMC内部温度变化情况。

2. 二维温度场数值计算

2.1. 求解域模型建立

图1为AMC的二维有限元求解域模型，其中A、B分别为轴孔与永磁外转子表面；a、b分别为测量温度检测点。

由图1可知，永磁外转子由磁极相互交错排列的永磁体及外轭铁组成；鼠笼内转子由笼条及内轭铁组成。永磁转子与鼠笼转子之间存在气隙。当电机启动时，其带动永磁外转子产生旋转磁场，使鼠笼内转子产生感应电动势及反感磁场，反感磁场与永磁体产生的磁场相互作用从而实现电机与负载之间转速与转矩的传递。

2.2. 热传递过程及基本方式

热传递可分为稳态和瞬态两大类。凡是物体中各点温度不随时间变化的称为稳态传热过程，反之则为瞬态传热过程。

由AMC的运行机理可知，其启动时的热传递为瞬态过程，而稳定运行时的热传递则为稳态过程。

热传递有三种基本方式：热传导、热对流和热辐射[8]。热传导是指固体与固体之间的传热；热对流是指固体与流体之间的传热；热辐射则通过电磁波传递能量。由于AMC不能产生电磁波，因此可忽略热辐射的影响，只考虑热传导和热对流。

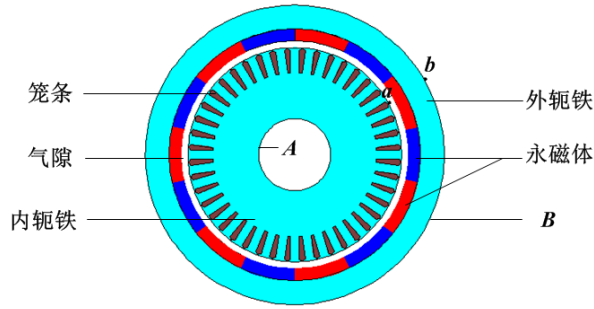


Figure 1. Two-dimensional finite element solving model of AMC

图 1. AMC 二维有限元求解域模型

2.3. AMC 导热偏微分方程的建立

基于传热学理论可知，在直角坐标系下二维稳态导热偏微分方程为[9]：

$$\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = -q_v \quad (1)$$

式(1)中， λ 为导热系数 $W/(m \cdot K)$ ； q_v 为鼠笼转子的热源密度 (W/m^3) 。

式(1)仅描述了导热过程共性的数学表达式，若要得到具体导热过程的特解，必须给出边界条件。

由图 1 可知，由于传动轴与内轭铁均为固体且过盈相联，因此轴孔表面 A 可看作热传导传热方式，符合第二类边界条件，假设轴孔表面 A 为绝热面，那么温度 T 在边界 A 上应满足：

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_A = 0 \quad (2)$$

式(2)中， n 为边界 A 的外法线方向， $\frac{\partial T}{\partial n}$ 表示外法向方向导数。

由于外转子表面 B 与空气形成对流换热，因此符合第三类边界条件，温度 T 在边界 B 上应满足：

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_B = \alpha (T - T_f) \quad (3)$$

式(3)中， α 为外轭铁与空气的散热系数 $W/(m^2 \cdot K)$ ， T_f 为外轭铁表面周围空气的温度。

根据变分原理可得出式(1)、式(2)及式(3)的泛函为：

$$J[T(x, y)] = \frac{\lambda}{2} \iint_{\Omega} \left[\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy - \iint_{\Omega} T q_v dx dy + \frac{\alpha}{2} \oint_B (T^2 - 2T_f T) dS \quad (4)$$

式(4)中， Ω 为求解域。

对泛函取极值，即 $\frac{\partial J}{\partial T} = 0$ 时，整理后按有限元格式表示为：

$$[K]^e [T]^e = [P]^e \quad (5)$$

式(5)中，矩阵 $[K]^e$ 为单元的温度刚度矩阵， $[T]^e$ 为单元节点温度向量， $[P]^e$ 为单元温度载荷向量。对于某个特定单元，单元温度刚度矩阵 $[K]^e$ 及单元温度载荷向量 $[P]^e$ 分别为：

$$K_{ij} = \int_{\Omega} \left(\lambda_x \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + \lambda_y \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} \right) d\Omega + \int_B \alpha N_i N_j d\Gamma \quad (6)$$

$$P_i = \int_B N_i \alpha T_j d\Gamma + \int_{\Omega} N_i q_v d\Gamma \quad (7)$$

式(6)中, N_i , N_j 为单元形函数, 与 $[T]^e$ 的关系为:

$$T = [N][T]^e \quad (8)$$

式(8)中, T 为单元内部温度分布。

在整个物体上的加权积分方程式是单元积分方程的和, 最终得到整体方程组为:

$$[K][T] = [P] \quad (9)$$

解式(9)的方程组即可得到各节点的温度值。

3. AMC 温度场分布前处理

本文以额定功率 22 kw, 永磁体为 7 对极的 AMC 为例, 对表 1 所示的 AMC 结构参数进行温度场分析计算。

3.1. 热源密度的确定

AMC 在工作中会产生内外转子的铁芯损耗(铁损)、笼条及永磁体的涡流损耗(铜损)。由于内外转子的铁损及永磁体的涡损远小于笼条的涡损, 因此可视笼条产生的涡损是 AMC 的唯一热源。

根据热源强度定义, 可得平均热源密度 q_v 为

$$q_v = \frac{P}{V} \quad (10)$$

式(10)中 V 为笼条总体积, 由于单个笼条形状可等效成立方体。因此式(10)中笼条总体积为:

$$V = nlhb \quad (11)$$

式(11)中 n 、 l 、 h 、 b 分别为笼条总数、笼条长度、笼条宽度及笼条厚度。

3.2. 导热系数的确定

由于内外转子旋转时可使 AMC 气隙中的空气流动, 而内外转子与气隙之间主要以对流方式换热, 因此 AMC 中温度场和流体场相耦合, 增加了求解难度。

为简化 AMC 温度场分析, 引入有效导热系数 λ_{eff} , 将气隙内流动空气的热交换过程等效为静止流体的导热系数, 并保证内外转子间所传递的热量与流动空气所传递的热量相等, 此时气隙中对流换热过程即为固体间的导热[5] [10]。

当气隙雷诺数 Re_g 大于临界雷诺数 Re_{cr} 时, 气隙中的空气流动为紊流, 此时有效导热系数 λ_{eff} [11] 为:

$$\lambda_{eff} = 0.0019\eta^{-2.9084} Re_g^{0.4614 \ln(3.33361\eta)} \quad (12)$$

式(12)中, $\eta = \frac{D_{out1}}{D_{in2}}$; $Re_g = \frac{\pi D_{out2}^2 n_1}{60\gamma}$, n_1 (r/min) 为外转子转速; γ (m^2/s) 为空气运动粘度系数。

3.3. 散热系数的确定

AMC 外转子表面和空气发生自然传热, 设外转子表面温度为与空气温度相同的初始温度, 则外转子表面散热系数 α 为[12]:

$$\alpha = \alpha_0 (1 + k\sqrt{v}) \quad (13)$$

式(13)中, α_0 为发热表面在平静空气中的散热系数; v 为空气吹拂表面 B 的速度; k 为考虑气流吹拂效率的系数; 根据 AMC 的材料属性, α_0 和 k 分别取 $16.7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 和 $1.3 (\text{s} \cdot \text{m}^{-1})^{\frac{1}{2}}$ [12]。

4. 温度场有限元仿真

4.1. 热源密度计算

由 Ansoft 电磁仿真系统可计算出如图 2 所示的笼条涡损。

由图 2 可知, 涡流损耗趋于平稳时, 笼条涡损的平均值 $p = 488.3 \text{ w}$ 。

将 p 和 V 代入式(10)中可得 $q_v = 1.25 \times 10^6$ 。

Table 1. Basic parameters of AMC

表 1. AMC 基本参数

符号	参数名称	数值
n_1	输入转速	$1500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$
P	额定功率	22 kw
p	永磁体极对数	7
n	鼠笼转子槽数	44
δ	气隙宽度	0.65 mm
D_{in1}	内转子内径	60 mm
D_{out1}	内转子外径	178.7 mm
D_{in2}	永磁转子内径	180 mm
D_{out2}	永磁转子外径	240 mm

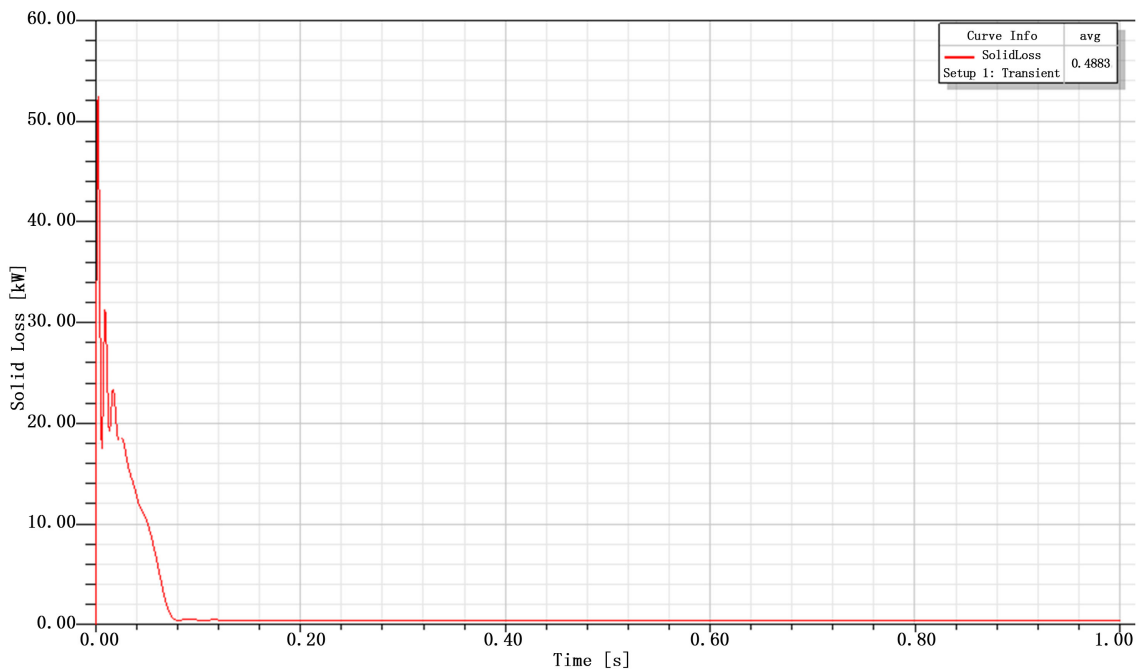


Figure 2. The finite element simulation of solid loss in squirrel

图 2. 笼条涡流损耗有限元仿真

4.2. 导热系数计算

已知 AMC 的输入转速 $n_1 = 1500 \text{ r/min}$ ，若设电机转差率 s 为 0.022，则输出转速 n_2 为 1467 r/min，在标准大气压，温度为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 的空气粘度系数 γ 为 $15.06 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ，将 n_2 、 γ 分别带入式(12)可得 λ_{eff} 为 2.04。

4.3. 散热系数计算

AMC 稳定输出时， $v = \frac{n_2 \pi D_{out2}}{60}$ ，将 α_0 、 k 、 v 分别代入式(13)中，可得 α 为 $110 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

若要增加外转子表面的散热系数，可以通过增大外置风扇的风力来增加空气吹拂表面的速度。

4.4. 温度场分析与计算

q_v 、 λ 和 α 确定后，即可将涡流损耗值 p 导入 ANSYS Workbench 中进行二维瞬态温度场仿真。

图 3 为 AMC 分别在 $t = 0$ 、700 s、2800 s、6400 s 时刻的瞬态温度场云图。其中，图 3(a)、图 3(b)、图 3(c)及图 3(d)分别为 AMC 由瞬态到稳态的温度变化过程图。

由图 3 可知，AMC 达到稳态时的最高温度位于鼠笼转子上，最低温度则位于外转子表面。随着时间的增加，鼠笼转子中的热量逐渐向四周均匀散热，最终达到图 3(d)所示的稳态效果。

图 4 为 AMC 从 0~6400 s 时的笼条、气隙、永磁体以及外轭铁的温度变化曲线图。

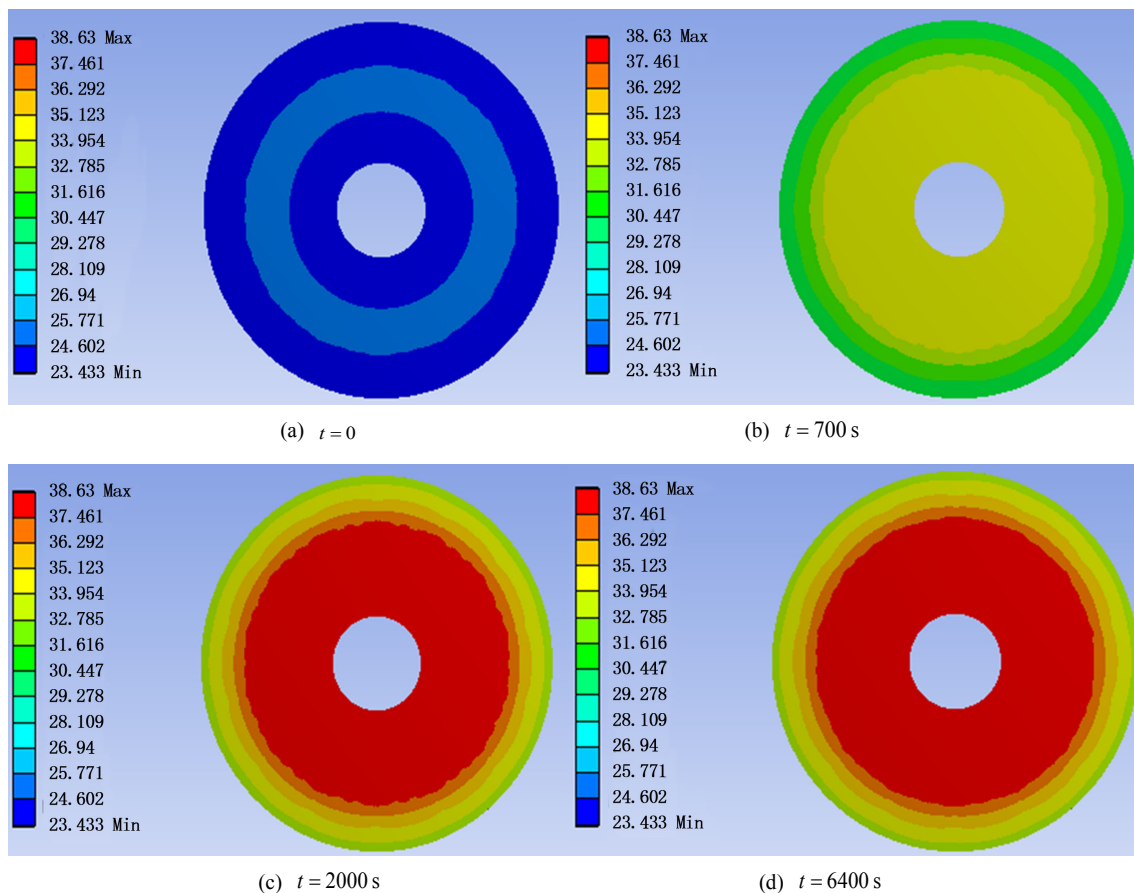


Figure 3. The plot of two-dimensional temperature field of AMC
图 3. AMC 二维温度场云图

由图 4 可以看出, AMC 从启动到稳态时笼条、气隙、永磁体以及外轭铁的温度变化趋势均为急剧上升然后再趋于平稳。达到平稳的时间也非常接近, 均在 2000 秒左右。由于绝大多数涡流损耗出现在笼条上, 因此笼条的温度最高, 又因空气的导热系数小、热阻性高, 因此阻碍了温度向四周散热的程度, 导致了永磁体及外轭铁的温度比笼条低。

图 5 为理论计算与有限元仿真对比图。

由图 5 可知, 理论平均温度与有限元仿真平均温度变化趋势一致, 均为先升高后平稳, 且理论值略小于仿真值, 但偏差不大, 验证了导热偏微分方程建立的正确性。

5. AMC 温度的测量

将 22 kw AMC 在额定负载条件下运行 2 h, 利用红外测温仪检测图 1 所示 a、b 处, 即气隙及永磁外转子外表面温度值。

表 2 为各测点温度值与理论计算值及仿真值比较。

由表 2 可知, 气隙的实际温度比外轭铁表面的温度略高, 是由于气隙距离笼条较近且外轭铁表面与

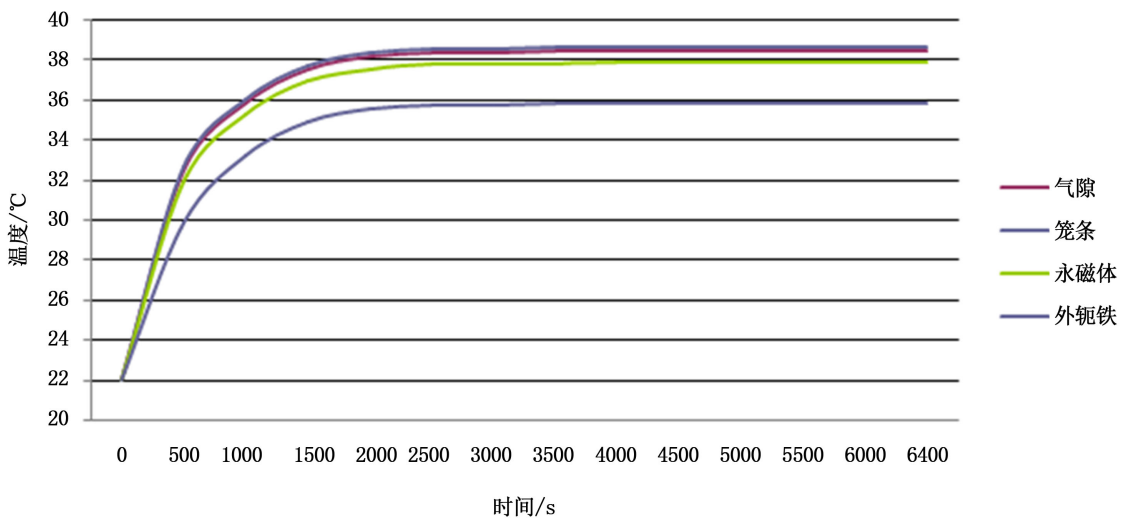


Figure 4. The temperature change curve of parts

图 4. 各部件温度变化曲线

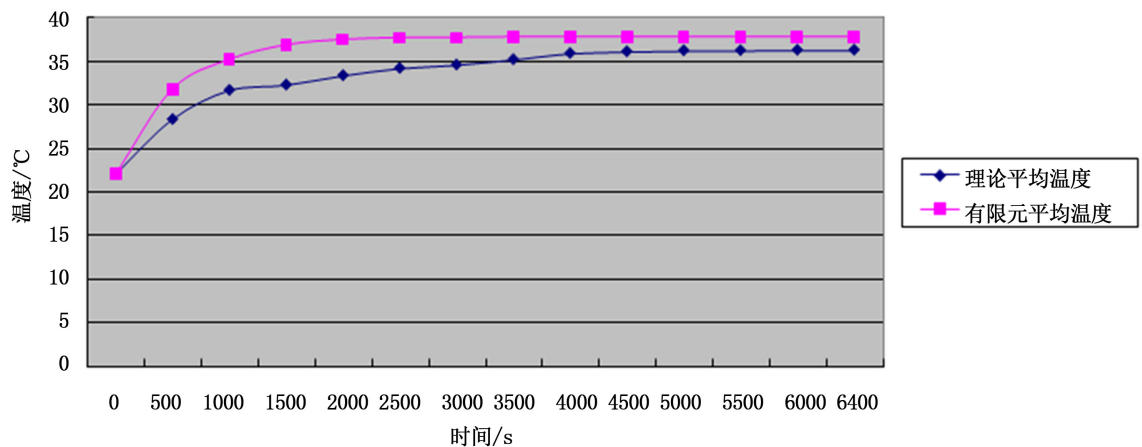


Figure 5. The relationship of temperature and time

图 5. 理论与仿真温度曲线对比图

Table 2. The comparison of measuring point temperature, theoretical calculation value and simulation
表 2. 各测点温度与理论计算值及仿真值比较

测量位置	a	b
实测值/°C	37.9	34.2
仿真值/°C	38.43	35.84
理论值/°C	34.23	31.86
仿真误差值/°C	0.53	1.64
理论误差值/°C	-3.67	-2.34

外界空气存在热对流交换，散热快，因此温度比气隙低。但从整体上看，二者测量值均与仿真值和理论值相当。此外，测量值与理论值及仿真值偏差均小于 5°C，满足工程计算精度要求，再一次验证了本文所建的导热偏微分方程及 ANSYS Workbench 仿真结果的正确性。本文所述的理论与有限元求解方法对于结构与 AMC 相似的磁力耦合器均适用。

6. 结论

1) AMC 启动时的热传递为瞬态过程，而稳定运行时则为稳态过程，且其仅有热传导和热对流两种传热方式。

2) 全域稳态温度场中，绝大多数涡流损耗出现在笼条上且全部转化为热源，气隙、永磁体及外轭铁的温度均低于笼条，但变化趋势与笼条相同。

3) 基于偏微分方程所建的温度场模型，既可节省求解时间，又可保证求解精度，可为 AMC 温度场计算及其温度场参数优化提供理论依据。

基金项目

国家自然科学基金资助项目(51375063)；大连市科技计划项目(2013A16GX109)。

参考文献 (References)

- [1] 石运卓 (2010) 笼型转子磁力耦合器励磁系统结构分析及参数优化. 硕士论文, 大连交通大学, 大连.
- [2] 温子琪 (2010) 笼型转子磁力耦合器永磁体计算及调速系统研究. 硕士论文, 大连交通大学, 大连.
- [3] Boglietti, A., Cavagnino, A., Lazzan, M., et al. (2003) A simplified thermal model for variable-speed self-cooled induction motor. *IEEE Transactions on Industry Applications*, **4**, 945-952.
- [4] Wang, R., Kamper, M.J., et al. (2005) Development of a thermo fluid model for axial field permanent-magnet machines. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, **1**, 80-87.
- [5] 张奕黄, 杨超南 (2012) 电动汽车用永磁电机温度场分析. 硕士论文, 北京交通大学, 北京.
- [6] 李伟力, 丁树业 (2005) 基于耦合场的大型同步发电机定子温度场的数值计算. *中国电机工程学报*, **13**, 129-134.
- [7] 丁文, 周会军, 鱼振民 (2005) 基于 ANSYS 的开关磁阻电机温度场分析. *微电机*, **5**, 13-15.
- [8] 王雪帆, 吴海鹰 (2007) 大中型永磁电机温度场数值计算. 硕士论文, 华中科技大学, 武汉.
- [9] 李伟立, 李守法 (2007) 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. *中国电机工程学报*, **24**, 86.
- [10] Zhang, Y.J. and Ruan, J.J. (2012) Calculation of temperature rise in air-cooled induction motors through 3-D coupled electromagnetic fluid-dynamical and thermal finite-element analysis. *IEEE Transactions on Magnetics*, **2**, 1047-1048.
- [11] 李伟力, 袁世鹏, 霍菲阳, 张奕黄 (2011) 基于流体传热理论永磁风力发电机温度场计算. *电机与控制学报*, **9**, 57-58.
- [12] 张泽东 (2012) 永磁磁力耦合器设计与关键技术研究. 硕士论文, 沈阳工业大学, 沈阳.

汉斯出版社为全球科研工作者搭建开放的网络学术中文交流平台。自2011年创办以来，汉斯一直保持着稳健快速发展。随着国内外知名高校学者的陆续加入，汉斯电子期刊已被450多所大中华地区高校图书馆的电子资源采用，并被中国知网全文收录，被学术界广为认同。

汉斯出版社是国内开源（Open Access）电子期刊模式的先行者，其创办的所有期刊全部开放阅读，即读者可以通过互联网免费获取期刊内容，在非商业性使用的前提下，读者不支付任何费用就可引用、复制、传播期刊的部分或全部内容。

