

Analysis of Temperature Field of the Canned Motor

Wenyi Yang¹, Huasheng Wang¹, Fandong Meng²

¹Institute of Space Launch Technology, Beijing

²CSR Zhuzhou Institute Co., Ltd., Zhuzhou

Email: ywy_s@msn.com, wanghs69@sina.com, meng287646750@163.com

Received: Apr. 4th, 2013; revised: May 7th, 2013; accepted: May 19th, 2013

Copyright © 2013 Wenyi Yang et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: The canned motor which has complex structure and large loss is mainly used in the transportation of liquid chemical, and its safe operation and stability is very important. Taken a canned motor as an example, physical model of three dimensional fluid and temperature coupled field was established according to hydromechanics and heat transfer theory. The temperature distribution of motor under nominal working condition was calculated by using finite volume method. By calculation, revealing the regularity of temperature distribution of canned motor and obtaining the conclusion that the temperature rise of stator strands and stator core are high, the temperature rise of rotor bars and rotor core are low, the location of maximum temperature rise of motor is in the upper end of stator stands, which provided the theory basis for structure design and accurate calculation of larger capacity canned motor.

Keywords: Canned Motor; Finite Volume Method; Temperature Field; Accurate Calculation

屏蔽电机温度场分析

杨文奕¹, 王华生¹, 孟繁东²

¹北京航天发射技术研究所, 北京

²南车株洲电力机车研究所有限公司, 株洲

Email: ywy_s@msn.com, wanghs69@sina.com, meng287646750@163.com

收稿日期: 2013年4月4日; 修回日期: 2013年5月7日; 录用日期: 2013年5月19日

摘要: 屏蔽电机结构复杂、损耗较大, 主要应用在化工液体的输送上, 其安全稳定的运行十分重要。本文以一台屏蔽电机为例, 根据流体力学及传热学理论, 建立三维流体场与三维温度场耦合的求解域物理模型, 采用有限体积法计算额定工况下电机的温度分布。通过计算, 揭示了屏蔽电机内各主要部件的温度分布规律, 得到定子股线、铁心温升较高, 转子铁心、导条温升较低, 最高温升发生在定子股线上端部的结论。可为屏蔽电机的结构设计以及更大容量屏蔽电机温度场的准确计算提供理论依据。

关键词: 屏蔽电机; 有限体积; 温度场; 准确计算

1. 引言

与传统电机结构设计相比, 屏蔽电机将屏蔽套安装在定、转子表面, 致使屏蔽电机气隙比普通型式感应电机大约 2.3 至 3.6 倍。屏蔽电机在设计上通常采用细而长的结构型式, 使得其铁心长径比比普通感应电机大 2 至 2.5 倍, 这样做的目的在于有效抑制屏蔽

套中涡流以及减少传输介质与转子外边面的摩擦^[1]。

近年来国内外的专家学者对大型汽轮发电机和水轮发电机及普通感应电机内温度场及流体场进行了大量的研究, 在电机的整体温度分布、流体流动性能取得了较大的研究成果^[2-9]。但较少研究屏蔽电机的温度分布情况, 因此对屏蔽电机温度场的研究意义十

分重大。

本文以一台屏蔽电机为例，基于流体力学及传热学理论，建立三维流体场与温度场耦合求解的数学模型和物理模型。通过计算，揭示了定子股线、转子导条、定转子铁心的温度分布规律，得出了相应的结论，对为屏蔽电机的结构设计以及更大容量屏蔽电机温度场的准确计算提供理论依据。

2. 模型的建立

2.1. 数学模型

2.1.1. 流体控制方程

电机冷却系统内流体流动与传热满足质量守恒定律、动量守恒定律、能量守恒定律^[10,11]。如果流动处于紊流状态，还要遵守附加的湍流运输方程，其守恒定律可以采用相应的控制方程进行描述，在直角坐标系中可以写出相应的流体通用控制方程如下：

$$\text{div}(\rho\mathbf{u}\varphi) = \text{div}(\Gamma\text{grad}\varphi) + S \quad (1)$$

通用控制方程的展开形式为：

$$\frac{\partial(\rho u\varphi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v\varphi)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w\varphi)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma\frac{\partial\varphi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma\frac{\partial\varphi}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\Gamma\frac{\partial\varphi}{\partial z}\right) + S \quad (2)$$

式中： \mathbf{u} 为速度矢量， u 、 v 以及 w 为速度在 x 、 y 以及 z 方向上的分量(m/s)； ρ 为流体密度(kg/m³)； φ 为通用变量，对于不同的控制方程，可以分别代表 1、 \mathbf{u} 、 k (脉动动能)、 ε (能量耗散率)以及 T_L (流体待求温度：℃)等求解变量； Γ 为广义扩展系数； S 为广义源项。

2.1.2. 三维热传导方程

针对各向异性材料，由传热学基本原理可以写出求解域内稳态温度场基本方程及其边界条件见式(3)。

式中 T 为固体待求温度(℃)； λ_x 、 λ_y 、 λ_z 为求解域内各种材料沿 x 、 y 以及 z 方向的导热系数 ($W/(m\cdot K)$)； q_v 为求解域内各体热源密度之和 (W/m^3)； α 为散热表面的散热系数 $W/(m^2\cdot K)$ ； T_f 为散热面周围流体的温度(℃)； S_j 、 S_s 分别为绝热和散热面。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_x\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_y\frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda_z\frac{\partial T}{\partial z}\right) &= -q_v \\ \frac{\partial T}{\partial n}\Big|_{S_j} &= 0 \\ -\lambda\frac{\partial T}{\partial n}\Big|_{S_s} &= \alpha(T-T_f) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial n}\Big|_{S_j} &= 0 \\ -\lambda\frac{\partial T}{\partial n}\Big|_{S_s} &= \alpha(T-T_f) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

采用数值计算方法，可以对发电机内的流场以及温度场进行强耦合数值研究

2.2. 物理模型

电机为双水冷冷却结构，根据电机结构及冷却系统对称的特点，将物理模型确定为：轴向整个电机，周向 1/8 区域，如图 1 所示。在图 1 中，Z 轴正方向为竖直向上的方向。一次冷却水由电机下部流向上部沿气隙冷却电机，二次冷却水由上部流向下部冷却电机机壳。

为了给定分析所需的采样位置，给出了图 2 所示的采样位置及截面剖分图。

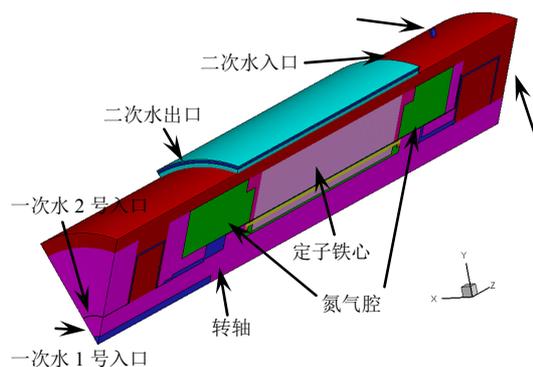


Figure 1. Physical model of solved region
图 1. 求解域物理模型

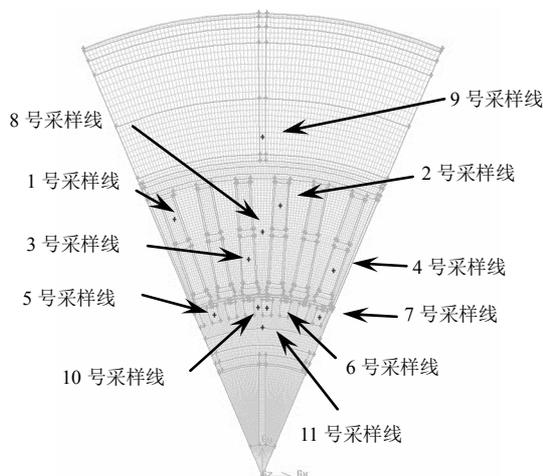


Figure 2. Sample locations and cross-section mesh
图 2. 采样位置及截面剖分图

如图 2 所示, 1、2 号采样线过定子下层股线中心线, 3、4 号采样线过定子上层股线中心线, 5、6、7 号采样线过转子导条中心线, 8 号采样线过定子齿部中心线, 9 号采样线过定子轭部中心线, 10 号采样线过转子齿部中心线, 11 号采样线过转子轭部中心线。

2.3. 基本假设及边界条件

2.3.1. 基本假设

为了简化求解过程, 做出以下基本假设^[12,13]:

1) 电机内流体流动的雷诺数很大($Re > 2300$), 属于湍流, 故采用湍流模型对电机内的流场进行求解;

2) 电机内流体流速远小于声速, 即马赫数(Ma 数)很小, 故把流体作为不可压缩流体处理;

3) 认为涡流效应对每根股线、导条的影响相同, 定子股线、转子导条铜损耗分别取其平均值, 并认为端部定子股线、转子导条是直的;

4) 由于只研究电机内流体流动的稳定状态, 即定常流动, 因而控制方程不含有时间项;

5) 认为转子外表面光滑, 忽略其对气隙中流体的切应力作用。

2.3.2. 边界条件

依据电机的性能参数, 结合温度场求解域的结构特点, 给定如下的边界条件:

1) 一次冷却水 1 号入口为速度入口边界条件;

2) 一次冷却水 2 号入口为速度入口边界条件;

3) 二次冷却水入口为速度入口边界条件;

4) 一次冷却水出口为压力出口边界条件;

5) 二次冷却水出口为压力出口边界条件;

6) S 面受到高温蒸汽的影响, S 面及其余暴露在环境中的机壳外表面, 采用流体相似理论及公式即可得到其相应的散热系数, 而电机内部固体表面的散热系数由流固耦合方式获取;

7) 流体除入口及出口边界条件外, 其余与固体的接触面均视为无滑移边界。

3. 额定工况下计算结果及分析

本研究采用有限体积法对电机内的流体场以及温度场进行耦合求解, 求解是在软件 fluent14 上进行的, 压力耦合方程组采用 SIMPLEC 算法, 其它方程采用 1 阶迎风格式, 计算 2360 步收敛, 获得了电机

温度分布特性。

图 3 为整个求解域内温度分布计算结果图。

根据图 3 的温度分布特性以及对数值计算结果的分析知: 电机定子股线温度较高, 定子铁心、转子、转轴、机壳温度较低。求解域内最高温升为 137.5 K 位于定子股线上端部。

图 4 为定子股线采样位置沿轴向的温度分布, 具体的采样位置如图 2 所示。

从图 4 可以看出, 定子股线两端温度较高, 中间温度较低。主要是由于定子股线两端伸出定子铁心处于氮气腔中, 冷却能力较差。定子股线中间部分与定子铁心接触很充分, 所以冷却能力很强。定子股线上端温度高于下端, 因为一次冷却水从下端到上端温度逐渐升高, 沿流道温度逐渐升高, 冷却能力变差, 对定子股线上端部的冷却能力强于下端部。

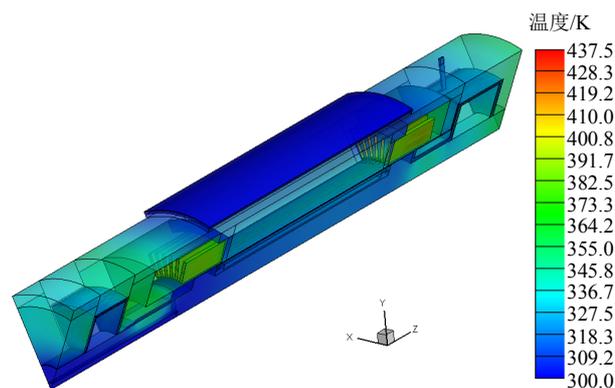


Figure 3. Result of three dimensional temperature
图 3. 三维温度场计算结果图

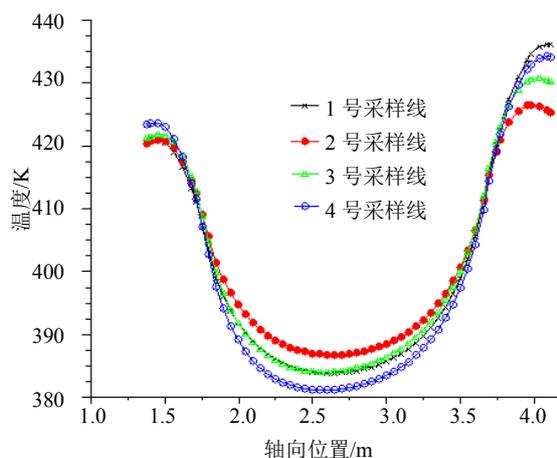


Figure 4. Temperature rise distribution of stator along with the axial length
图 4. 定子股线采样线沿轴向的温度分布

图5为转子导条采样位置沿轴向的温度分布,具体的采样位置如图2所示。

从图5可以看出,转子导条温度较低,由于转子导条与转子铁心接触很充分,转子导条的热量主要沿径向传递给转子铁心。在图中还可以看出,转子导条温度沿轴向近似成线性分布,温度由下部到上部逐渐增加。由于一次冷却水由下部到上部冷却电机,冷却水温度沿流道逐渐增加,冷却能力逐渐变差。

图6为定子铁心采样位置沿轴向的温度分布,具体的采样位置如图2所示。

从图6可以看出,定子铁心齿部温度高于定子铁心轭部,由于定子铁心齿部贴近定子股线,定子股线沿径向把热量传递给定子铁心齿部。

图7为转子铁心采样位置沿轴向的温度分布,具体的采样位置如图2所示。

从图7可以看出,转子铁心温度较低,由于转子

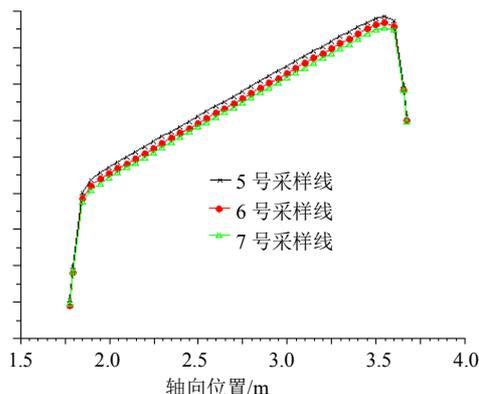


Figure 5. Temperature rise distribution of rotor bar along with the axial length

图5. 转子导条采用位置沿轴向的温度分布

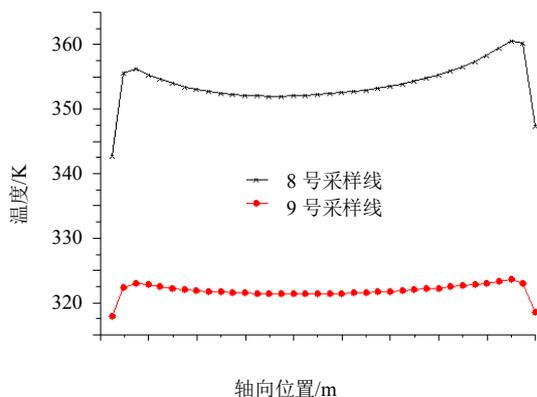


Figure 6. Temperature rise distribution of stator core along with the axial length

图6. 定子铁心采样线沿轴向的温度分布

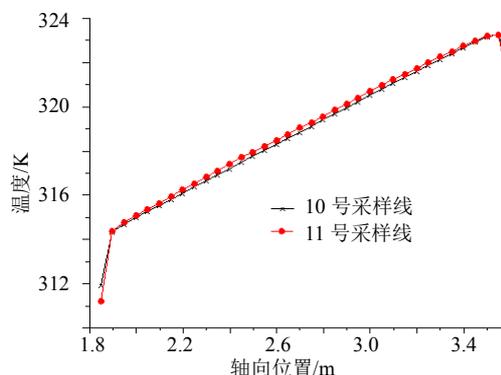


Figure 7. Temperature rise distribution of rotor core along with the axial length

图7. 转子铁心采样线沿轴向的温度分布

铁心与一次冷却水接触充分。转子铁心中部温度沿轴向成线性分布,温度由下部到上部逐渐增加。主要是由于一次冷却水由下部到上部冷却电机,冷却水温度沿路径逐渐增加。转子铁心齿部与轭部沿轴向有相同的温度分布,主要是由于转子铁心沿径向的散热能力很强。

4. 结论

本文通过对额定状态下屏蔽电机流体场、温度场的数值计算及分析,得出如下结论:

- 1) 额定工况下,定子股线两端温升较高,定子股线上端部温升高于下端部,定子股线中部温升较低,全域最高温升发生在定子股线上端部为 137.5 K。
- 2) 转子导条、转子铁心温升很低,损耗热量主要沿径向传递给一次冷却水,散热能力很强,各转子导条散热情况相同。
- 3) 受到定子股线发热的影响,定子铁心齿部温升高于定子铁心轭部,温升较高,定子铁心轭部远离其它热源温升较低。
- 4) 电机定子股线、定子铁心、转子导条、转子铁心等部件的温升,受到一次冷却水温升随高度的增加而增大的影响,导致定子内部件的温升上部略高于下部。

参考文献 (References)

- [1] 梁超国. 屏蔽泵的结构、原理及其应用[J]. 化工设备设计, 1998, 35(1): 44-49.
- [2] 霍菲阳, 李勇, 李伟力等. 大型空冷汽轮发电机定子通风结构优化方案的计算与分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(6):

- 69-74.
- [3] D. A. Staton, A. Cavagnino. Convection heat transfer and flow calculations suitable for electric machines thermal models. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008, 55(10): 3509-3516.
- [4] 姚若萍, 饶芳权. 蒸发冷却水轮发电机定子温度场研究[J]. *中国电机工程学报*, 2003, 23(6): 87-90.
- [5] M. S. Rajagopal, K. N. Seetharamu, P. A. Aswatha, et al. Finite element analysis of radial cooled rotating electrical machines. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 1999, 9(1): 18-38.
- [6] A. Boglietti, A. Cavagnino, M. Lazzari, et al. A simplified thermal model for variable-speed self-cooled industrial induction motor. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2003, 39(4): 945-952.
- [7] 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: 1-4.
- [8] 李伟力, 杨雪峰, 顾德宝等. 多风路空冷汽轮发电机定子内流体流动与传热耦合计算与分析[J]. *电工技术学报*, 2009, 24(12): 24-31.
- [9] 丁树业, 葛云中, 陈卫杰等. 双馈风力发电机三维温度场耦合计算与分析[J]. *电机与控制学报*, 2012, 16(3): 83-89.
- [10] 丁树业, 孙兆琼, 徐殿国等. 3 MW 双馈风力发电机传热特性数值研究[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(3): 137-143.
- [11] 丁树业, 孟繁东, 葛云中. 核主泵屏蔽电机温度场研究[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(36): 149-155.
- [12] 丁树业, 孙兆琼, 姜楠等. 大功率双馈风力发电机内部流变特性数值仿真[J]. *电机与控制学报*, 2011, 15(4): 28-34.
- [13] 魏永田, 孟大伟, 温嘉斌. 电机内热交换[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998: 70-80.