防爆型水冷电机内换热与温度场计算

温嘉斌[1,2], 许明宇[1]
(1. 哈尔滨理工大学 电气与电子工程学院,黑龙江 哈尔滨 150040; 2. 哈尔滨工业大学 电气工程系,
黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 采煤机电机安装空间严格受限,随着电机设计容量的提升,使单位体积损耗 (发热率)增大。为了研究该类电机的发热与冷却问题,在对防爆型水冷电机的结构、材料以及换热机理进行分析的基础上,建立了防爆型水冷电机的传热数学物理模型。采用有限元法对电机定、转子及水套的温度场进行了计算与分析。通过计算结果与实测值对比,验证所建传热模型可以真实反映实际传热过程。分析计算结果表明电机定子最高温度点位于定子上层绕组近气隙侧;定子齿是热量传递的主要通道,热流密度最大;选用适当的冷却水流速,可以用最小的代价获取所需的冷却效果。研究结果可以为采煤机电机热控制和优化设计提供理论依据。

关键词: 防爆型水冷电动机; 有限元; 换热; 温度场
中图分类号: TM301.4 **文献标识码**: A **文章编号**: 1007-449X(2009)03-0393-05

Calculation on heat exchange and temperature field in water-cooled explosion-proof motor

WEN Jia-bin[1,2], XU Ming-yu[1]
(1. College of Electrical & Electronic Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150040, China;
2. Department of Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The motor used in the shearer is installed in a limited space, with the increase of the design capacity, unit volume loss (heating rate) increases in it. In order to study the heating and cooling problems of the motor, heat transfer simulation model for water-cooled explosion-proof motor was established on the basis of analyzing its structure, materials, and heat exchange mechanism. Upon that the temperature field was calculated and analyzed in the stator, rotor and water jacket of the motor with finite element method. By comparing the experimental data and the calculated results, the model was verified. Calculation results show that the highest temperature of stator is in the upper layer of the coil near the air gap, and the Stator teeth is the main channel of heat transfer, in which the heat flux density is maximum, and the appropriate flow velocity of the cooling water can obtain the required cooling effect with the minimum cost. The works provide a theoretical basis for the thermal control and optimal design of water-cooled motor used in the shearer.

Key words: water-cooled explosion-proof motors; finite element method; heat exchange; temperature field

收稿日期: 2007-09-28
基金项目: 黑龙江省自然科学基金 (E200626);国家科技支撑计划 (2008BAF34B04)
作者简介: 温嘉斌 (1961-),男,博士后,教授,主要研究方向为电机及电机控制;
许明宇 (1976-),男,硕士,主要研究方向为电机综合物理场计算。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1 引 言

薄煤层采煤机用防爆型水冷电动机由于安装空间严格受限,其技术发展趋势是加大单位体积功率。随着电机设计容量的提升,使单位体积损耗(发热率)增大,引起电机温度升高,因此限制其温升成为该类电机设计中的主要技术问题。

本文所研究的防爆型水冷电动机是根据国内采煤机生产企业的实际需求,为新型采煤机配套的专用电动机,其发热与冷却问题,涉及电磁场、多流体场(冷却水和空气)、温度场耦合求解。以 YBCM150-4高功率密度水冷电动机为例,在对其结构、材料以及换热机理进行分析的基础上,根据电磁场、流体场、温度场耦合的强弱,通过人工解耦建立了防爆型水冷电机的发热与传热仿真模型,模拟了定、转子的温度场,研究了水冷却器的冷却性能。研究结果可以为采煤机电机热控制和优化设计提供理论依据。

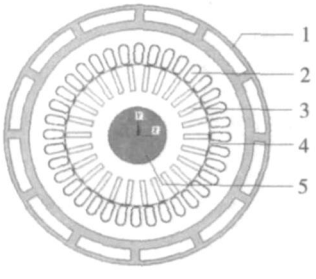
2 水冷电动机发热与传热仿真模型

2.1 YBCM150-4电机的结构

YBCM150-4采煤机用防爆型水冷电动机如图 1所示。其截面结构示意图如图 2所示。电机定子外壳设计了冷却水套,冷却水从入水口进入水套,依次循环于所有水道中冷却整个电机。

图 1 YBCM150-4 电机结构图

Fig. 1 Outside view of the motor YBCM150-4



1—冷却水套;2—定子绕组;3—转子铜条;4—气隙;5—转子轴

图 2 YBCM150-4 电机截面结构示意图

Fig. 2 Cross-section diagram of the YBCM150-4 motor

2.2 发热计算模型

准确计算电机中的热源大小及其分布是其温度场计算的基础。电机在运行中产生的损耗基本上都要转变为热能而成为热源,电机的损耗一般可分为:基本铁耗、铜耗、附加损耗和机械损耗等。

铁耗分布决定于电机磁场分布,因此,计算电机中的热源大小及其分布须计算其电磁场。考虑到铁耗基本与温度无关,电磁场可不计与流体场、温度场耦合而独立计算。

2.2.1 电磁场计算模型

电磁场求解区域为图 2除去冷却水套的内部区域,共有五种媒介:定转子叠片铁心、定转子绕组、槽楔、定子槽绝缘和转子轴。其二维瞬态涡流方程可表示为非线性方程和边界条件

$$\left.\begin{aligned}&\Omega:\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{1}{\mu}\frac{\partial A}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{1}{\mu}\frac{\partial A}{\partial y}\right)=-J+\mu\sigma\frac{\partial A}{\partial t},\\&\Gamma:B_n=0。\end{aligned}\right\}\quad(1)$$

式中:Ω 为求解区域;Γ 为定子铁心外圆的边界;J 为源电流密度;A 为向量磁位。

2.2.2 电磁场计算结果与分析

本模型 YBCM150-4是四极三相异步电机,建模时输入的实体模型参数为:额定功率 40 kW;额定电压 1 140 V;额定电流 25.5 A;额定转速 1 457 r/min;功率因数 0.864;额定效率 91.83%。

根据以上数据、材料属性和边界条件,加载电流由有限元法拟合求得电机额定运行时,求解域上的磁通密度分布云图如图 3所示。可以看出设计时使定子轭部和齿部磁通密度较大,基本铁耗和附加损耗也相对较大,有利于充分利用定子水套散热。

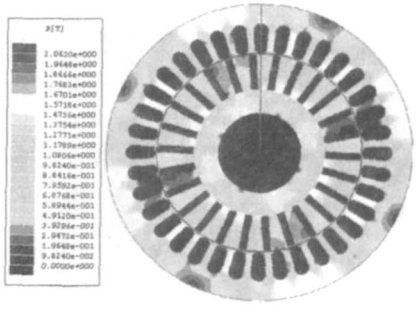


图 3 磁通密度分布云图

Fig. 3 Distribution nephogram of magnetic flux density

2.3 电机温度场计算模型

该防爆型水冷电机温度场求解区域为图 2所示的区域,共有六种媒介:叠片铁心、绕组铜线、不锈钢水套、非磁性槽楔、定子槽绝缘、空气隙和转子轴,对其模拟和计算是基于以下假设得出的[1,2]。

1)把传导介质当作各向同性物质;

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2)定、转子槽中绕组的匝间绝缘对传热的影响归算到绕组的导热系数中,取其平均值;

3)转子鼠笼铜条与铁心的接触热阻忽略不计;

4)定、转子间只通过气隙进行热交换;

5)不计热辐射作用。

2.3.1　温度场与流体场耦合计算模型

考虑到空气隙流体温度与定转子温度场密切关联,空气隙流体场应与温度场耦合计算。由傅里叶热传导定律和牛顿冷却公式知,电机稳态运行时,其二维稳态热传导方程可表示为[3]

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_x\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k_y\frac{\partial T}{\partial y}\right)=-q。\tag{2}$$

式中:T为温度;k_x、k_y分别为 x、y方向的导热系数;q为发热率。

在忽略重力和浮力的情况下,可写出空气隙流体二维稳态换热控制方程,即

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}=0,\tag{3}$$

$$\frac{\partial(\rho uu)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho uv)}{\partial y}=\frac{\partial}{\partial x}\left[\mu\frac{\partial u}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[\mu\frac{\partial u}{\partial y}\right]-\frac{\partial p}{\partial x},\tag{4}$$

$$\frac{\partial(\rho vu)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho vv)}{\partial y}=\frac{\partial}{\partial x}\left[\mu\frac{\partial v}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[\mu\frac{\partial v}{\partial y}\right]-\frac{\partial p}{\partial y},\tag{5}$$

$$\frac{\partial(\rho uT)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho vT)}{\partial y}=\frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{\lambda_1}{c_p}\frac{\partial T}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[\frac{\lambda_1}{c_p}\frac{\partial T}{\partial y}\right]。\tag{6}$$

式中:u和 v为速度矢量在 x和 y方向上的分量;ρ为流体密度;μ为动力粘度;p为流体压力;c_p为空气比热容;T为流体温度;λ_1为流体的导热系数。

2.3.2　对流换热系数的确定

本模型电机进水口温度为 30.0 ℃,出水口温度为 35.0 ℃,平均温度为 32.5 ℃,其可近似为与温度场无关的常数,将它们解耦为温度场求解区域的第三类边界条件,即

$$\alpha_w(T-T_c)=-k\frac{\partial T}{\partial n}。\tag{7}$$

式中:T_c为 S面周围介质平均温度;α_w为 S面冷却水的换热系数[4]。

水套内的换热状况为管内强制对流换热,且属于非圆形截面的槽道,其当量直径为

$$d_e=4f/U。\tag{8}$$

式中:f为槽道的截面积;U为润湿周长。当 $L/d_e>60$,L为水套的有效长度,平均表面换热系数可以不考虑入口效率。雷诺数为

$$Re_f=u_f d_e/\nu。\tag{9}$$

式中:u_f为冷却水平均流速;ν为水的运动粘度。当 $2\,200<Re_f<10\,000$时,该流体运动状况属于过渡区状况,可先用过渡区平均换热关联式试算[5],即

$$Nu_f=0.012(Re_f^{0.87}-280)Pr_f^{0.4}\times[1+(d_e/L)^{2/3}](Pr_f/Pr_w)^{0.11}。\tag{10}$$

且该关联式必须满足适用条件

$$1.5<Pr_f<500\text{和}\ 0.05<Pr_f/Pr_w<20。\tag{11}$$

其中:Pr_w为水套内壁平均温度;T_w时水的普朗特数;其余为平均温度 32.5 ℃下水的物性。则所求水套平均换热系数为

$$\alpha_w=Nu_f\lambda_f/d_e。\tag{12}$$

式中:λ_f为 32.5 ℃下水的导热系数,为 0.622 25 W/(m·K)。由于计算初始,水套内壁平均温度 T_w并未知晓,可用一个初值 Pr_w代入,得到新的平均温度 T_w',经过三、四次迭代后,即可得到满足工程计算误差范围内的平均换热系数。

安装后,电机外壳表面大部分处于密闭空气腔中,换热状况可认为绝热面,即

$$\alpha=0。\tag{13}$$

3　水冷电动机温度场计算

3.1　导热系数的确定

求解域内六种媒介的导热系数如表 1所示[6]。

表 1　媒介的导热系数

Table 1　Thermal conductivity of the media

结构部件	导热系数/W·m⁻¹·k⁻¹
水套	25
绕组	379
叠片铁心	21
槽楔	14
定子槽绝缘纸	0.26
转子轴	44.2

3.2　温度场计算结果与分析

根据上述方法和边界条件,可以拟合求得整个截面上的温度分布如图 4所示。

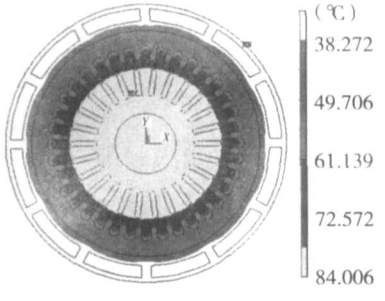


图 4　电机温度场云图

Fig. 4　Nephogram of motor temperature field

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

从图 4可以看出,定子最高温度点在上层绕组近槽楔侧。其原因是定子的主要热源是槽内导体铜耗,外围水套的冷却作用使得定子绕组外侧温度大大下降,层间绝缘的高热阻拉大了上下层绕组的温度差,最高温差近 13 ℃,如图 5所示。

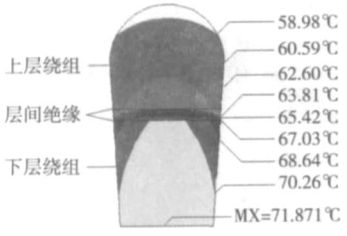


图 5 定子绕组温度场云图

Fig 5 Temperature field nephogram of stator winding

4 水冷电动机传热与换热

4.1 水冷电动机传热

利用有限元软件还可以得到求解域中各部分间的热流密度,如图 6所示。可以看出,定子齿部是热量传递的主要通道,是整个电机热流密度最大的地方。定子绕组散热困难,证明绝缘热阻对绕组散热有很大的限制。

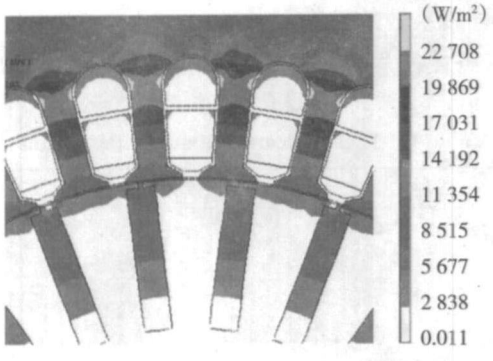


图 6 热流密度局部图

Fig 6 Part figure of heat flux density

4.2 流速对防爆型水冷电机温度场影响

改变冷却水流速,温度场边界条件发生变化,防爆型水冷电机的温度分布也就有所不同,图 7、8和 9分别示出水套内冷却水平均流速 u_f取 0.30 m/s、0.40 m/s和 0.45 m/s时防爆型水冷电机的温度场云图。

可以看出,随着水套内冷却水流速增加,电机整体温度下降,但冷却效率却也开始降低,即定子最高温度 -冷却水流速 T_s - u_f 曲线的下降曲率变缓,如图 10所示。这时定子绕组每降低一度,需要增加更大的流速,因此,设计时要选用适当的流速,以最小的代价获取所需的冷却效果。

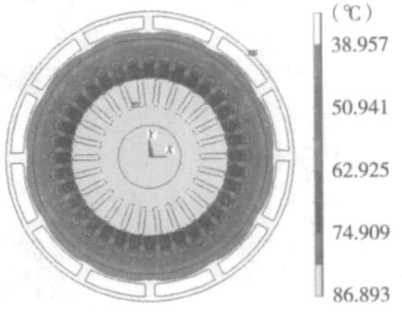


图 7 u_f =0.30 m/s 时温度场云图

Fig. 7 Nephogram of motor temperature field when u_f =0.30 m/s

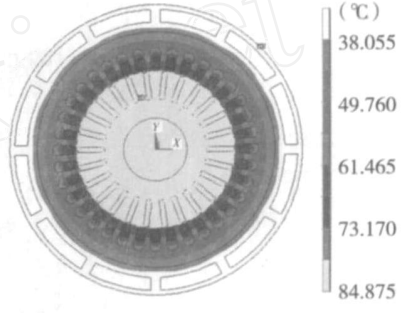


图 8 u_f =0.40 m/s 时温度场云图

Fig. 8 Nephogram of motor temperature field when u_f = 0.40 m/s

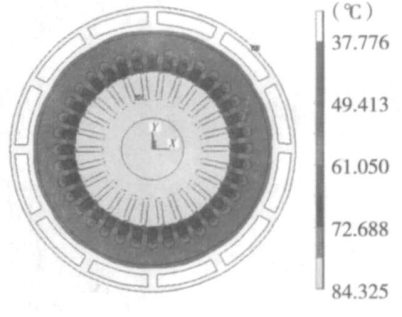


图 9 u_f =0.45 m/s 时温度场云图

Fig. 9 Nephogram of motor temperature field when u_f = 0.45 m/s

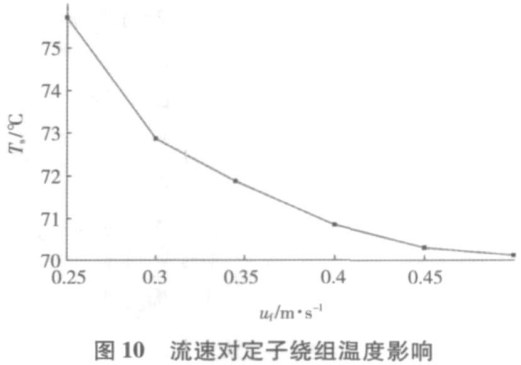


图 10 流速对定子绕组温度影响

Fig. 10 The effect of flow variety to the temperature in stator coil

4.3 实验与计算结果

样机 YBCM150 - 4额定负载下温升实验的实测

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

值与温度场计算值对比见表 2。该台电动机的基本参数为: P_N = 40 kW, $\cos\Phi_N$ = 0.85, U_N = 1 140 V, I_N = 26 A, n_N = 1 453 r/min, p = 2, S1工作制。由于温升实验无法直接测量转子温度,采用测量轴端温度的方法,忽略了轴端散热和轴段轴向温度梯度,实测值偏小,可见计算结果与实验结果吻合。

表 2　电机温度场计算值与实测值对比

Table 2　Calculation values of temperature field compared with the measured values

区域	实测平均温度 /℃	计算温度 /℃	相对误差 /%
定子绕组最高温度	76.0	71.87	5.4
转子平均温度	76.0*	85.01	
水套外壳平均温度	35.0	32.63	6.8

*实测的轴端温度

5　结　语

本文根据电磁场、流体场、温度场耦合的强弱,通过适当的人工解耦,建立了较准确的防爆型水冷电机发热与传热仿真模型,模拟结果表明:

1)定子齿部是热量传递的主要通道,是整个电机热流密度最大的地方。定子绕组散热困难,证明绝缘热阻对绕组散热有很大的限制。

2)电机定子最高温度点在定子上层绕组近槽楔侧,因此只需在定子下层绕组靠气隙侧埋设热电偶,监督其温度变化,就可保障整个电机的安全运行。

3)从上面的仿真可以看到,选用适当的冷却水流速,可以用最小的代价获取所需的冷却效果。

参 考 文 献:

[1] 丁舜年. 大型电机的发热与冷却 [M]. 北京:科学出版社, 1992.

[2] ZOU Jibin, ZHANG Hongliang, WANG Qian. Numerical calculation and analysis of 3D transient temperature field for tractive PMSM for elevator [C] // *International Multi Conference of Engineers and Computer Scientists*, March 21 - 23, 2007, Hongkong, 2007 (2): 1710 - 1715.

[3] 孔祥谦. 有限单元法在传热学中的应用 [M]. 北京:科学出版社, 1986.

[4] ALEKSEEV G V. Solvability of stationary boundary control problems for heat convection equations [J]. *Siberian Mathematical Journal*, 1998, 39 (5): 844 - 858.

[5] 杨世铭. 传热学 [M]. 北京:高等教育出版社, 1987.

[6] 温嘉斌,孟大伟,鲁长滨. 大型水轮电机通风发热综合计算 [J]. 中国电机工程学报, 2000, 20 (11): 6 - 9.
WEN Jiabin, MENG Dawei, LU Changbin. Synthetic calculation for the ventilation and heating of large water wheel generator [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2000, 20 (11): 6 - 9.

(编辑:刘素菊)

(上接第 392页)

WEI Kun, HU Changsheng, ZHANG Zhongchao. A novel PWM scheme to eliminate the diode freewheeling of the inactive phase in BLDC motor [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2005, 25 (7): 104 - 108.

[5] 张晓峰,吕征宇. 有效平滑无刷直流电机转矩的新方法 [J]. 电力电子技术, 2007, 41 (2): 102 - 104.
ZHANG Xiaofeng, LV Zhengyu. New BLDCM drive method to smooth the torque [J]. *Power Electronics*, 2007, 41 (2): 102 - 104.

[6] 张磊,瞿文龙,肖伟,等. 一种降低无刷直流电机 EPS系统损耗的 PWM控制策略 [J]. 电工技术学报, 2006, 21 (8): 83 - 89.
ZHANG Lei, ZHAI Wenlong, XIAO Wei, *et al*. Low loss PWM control strategy for EPS system with BLDC motors [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2006, 21 (8): 83 - 89.

(编辑:刘素菊)

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net