

汽轮发电机转子轴径向导线温度场分析与研究^{*}

孙永彪¹, 王坤², 付超¹, 聂婷婷¹, 康浩¹, 那媛媛¹

(1. 河北师范大学中燃工学院, 河北石家庄 050000;

(2. 华中科技大学能源与动力工程学院, 湖北武汉 430070)

摘要: 某大型空冷汽轮发电机转子采用导线双侧进风的冷却方式。为了研究轴径向绕组导线数量、中空导线的通流面积差异、导线位置(径向与周向)对导线内流量、进出口温度、进出口温度差、平均温度的影响,建立了包括端部弧段和轴径向段转子槽内外流域及与之对应的气隙在内的半轴段 1/2 圆三维物理模型。依据计算流体力学原理,采用有限体积法,对计算域内的三维热流场进行了数值模拟。结果表明:位于绕组 L_1 、圆周 R_{12} 的导线具有的最大流量为 $0.0189 \text{ m}^3/\text{s}$;温度最高导线位于绕组 T_5 、圆周 R_2 处,达 $129.10 \text{ }^\circ\text{C}$,在电机正常工作范围内;通过方差分析发现径向、周向位置分布对导线平均温度不均性的影响差异较小,而导线通流面积对其的影响较大。

关键词: 汽轮发电机; 转子; 三维热流场; 轴径向; 导线

中图分类号: TM 301.4[†]1 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)02-0060-06

doi: 10.12177/emca.2019.160

Analysis and Research on the Temperature Field of the Axial-Radial Direction Conductor in the Rotor of Turbine Generator^{*}

SUN Yongbiao¹, WANG Kun², FU Chao¹, NIE Tingting¹, KANG Hao¹, NA Yuanyuan¹

(1. College of Zhongran Engineering, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050000, China;

2. College of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: A large air-cooled turbine generator rotor adopts the cooling mode of wind inlet from both sides of the wire. In order to study the influences of the number of conductors in the slots, the conductor flow areas and the radial and circumferential locations of conductors on the distribution in the hollow conductor mass flow, inlet-outlet temperature difference and the average temperature, 1/2 circle and half rotor model is established, including end winding, winding active part, airgap and the fluid domain. According to the principle of computational fluid dynamics, the finite volume method is used to simulate the three-dimensional heat flow field in the computational domain. The results show that the conductor located in circumference R_{12} and winding L_1 has the maximum flow rate of $0.0189 \text{ m}^3/\text{s}$, while the conductor at circumference R_2 and winding T_5 has the dangerous part with the highest temperature reaching $129.10 \text{ }^\circ\text{C}$, which is still within the rotor normal temperature range. Through the variance analysis, it is found that radial and circumferential position distribution has similar effects on the conductor average temperature heterogeneity, and the influence of the conductor flow area is greater.

Key words: turbine generator; rotor; three-dimensional heat flow field; axial-radial direction; conductor

收稿日期: 2019-11-12; 收到修改稿日期: 2019-12-20

^{*} 基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2015CB251504)

作者简介: 孙永彪(1988—),男,硕士,讲师,研究方向为大型电力机械冷却问题的数值分析。

王坤(1975—),男,博士,副教授,硕士生导师,研究方向为强度振动、流动、传热问题的数值分析。(通信作者)

0 引言

大型汽轮发电机效率一般可达到 98% 以上, 其余 1%~2% 以电磁和机械耗损的形式存在^[1]。随着发电机单机容量日益增大, 由能量转换、电磁作用和机械转动摩擦所产生的电机损耗也大幅度增加^[2]。工程上一般通过强制进风的方式将损耗产生的热量带离工作区域, 降低电机部件峰值温度, 缩小轴向温差, 以提高电机运行的可靠性。因此, 对电机绕组导线的温度场进行研究有利于电机的结构设计。

目前与汽轮发电机定子温度场相比^[3-5], 对转子温度场的研究相对较少^[6-7]。在汽轮发电机转子温度场的研究中, 虽然采用等效风路法可以计算出电机峰值温度, 但无法解决工程上对于温度危险位置定位的要求, 对汽轮发电机转子温度场在空间分布特点仍存在认识上的不确定性; 现有文献采用计算机仿真技术计算其温度分布, 但受限于不完整的物理模型^[6-7]。汽轮发电机转子结构复杂、构成部件较多, 在计算过程中虽然已有一定程度的简化, 例如单绕组模型、端部流场简化模型, 可以节省人力物力, 但计算结果存在一定疑问, 且无法得到多个绕组导线、多个方向温度的分布特点。

本文采用有限体积法, 对某大型空冷汽轮发

电机转子全域热流场进行了研究; 建立了转子半轴向段 1/2 圆包括端部(转子槽内、外流道)、轴径向、气隙的通风结构物理模型, 对转子轴径向绕组导线内热流场进行了分析; 研究了绕组导线内热流场在径向、周向的分布特点, 确定了温度危险导线的位置。

1 模型建立

1.1 物理模型与网格划分

1.1.1 转子分区及冷却原理

该电机转子开设 32 个转子槽, 内放有 32 个线圈绕组, 总共 368 根导线; 电机轴向关于中心面(轴向对称面)对称、周向关于水平面(周期对称面)周期对称, 建立了半轴向 1/2 圆的物理模型。转子槽(包括绕组、导线)被转子大齿隔成左右对称的两部分[关于极中心面(极中心对称面)对称], 半轴向 1/2 圆物理模型包括 16 个转子槽, 内放有 16 个线圈绕组, 总共 184 根导线。取距离转子本体端部 52 mm 处平面为基准, 位于该基准面左边的区域命名为端部区域, 位于基准面右边的区域命名为轴径向区域; 电机转向为顺时针, 在该模型中极中心对称面的右侧为迎风前缘(Leading Side), 左侧为背风后缘(Trailing Side), 故将左半部分命名为背风区, 简称 T 区, 右半部分为迎风区, 简称 L 区, 如图 1 所示。

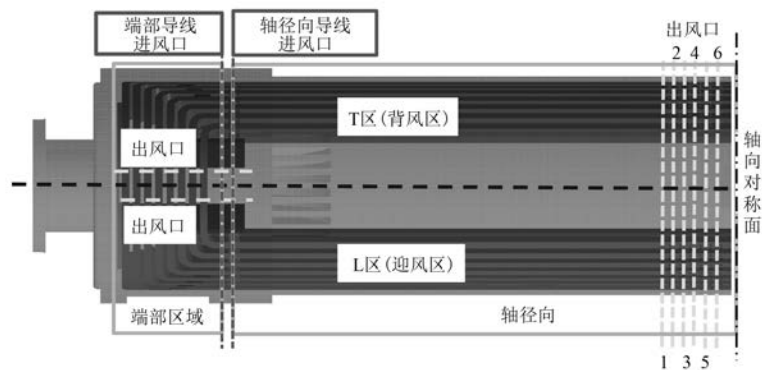


图 1 计算域(流体域及固体域)物理模型

沿逆时针方向从极中心对称面到周期对称面的绕组命名为 $T_1 \sim T_8$, 顺时针方向为 $L_1 \sim L_8$ 绕组, 绕组 T_1, L_1 由 8 根导线组成, 且截面积相同, 其余绕组都均 12 根导线组成且截面积不同(4 根靠近转子中心的导线截面积小于其余 8 根); 在径向方

向靠近转子中心的导线在圆周 R_1 上, 最外层导线在圆周 R_{12} 上, 导线内有空腔双侧进风, $R_1 \sim R_4$ 圆周上导线的通流面积为 A_1 , $R_5 \sim R_{12}$ 圆周上导线的通流面积为 A_2 ; 位于端部区域的导线简称为端部导线, 位于轴径向区域的导线简称为轴径向

导线,本文的研究对象为轴径向导线。导线的位置用绕组(周向位置)和圆周(径向位置)的组合表示,如在绕组 T_1 径向 R_5 的导线命名为 D

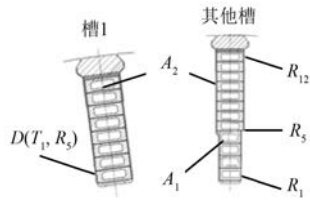


图2 转子通风系统绕组导线命名示意图

(T_1, R_5),如图2所示。绕组1、2、3、4之间没有挡风板,其余相邻绕组之间设有挡风板,如图3所示。

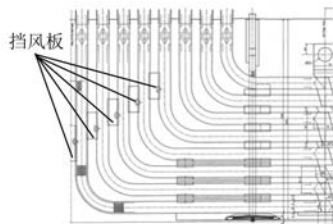
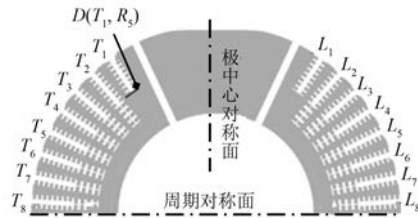


图3 绕组间挡风板示意图

该电机转子-气隙通风系统采用两端对称的风扇加强的强制进风方式:(1)冷却空气直接进入转子与定子之间的气隙通道对转子铁心及槽楔进行冷却。(2)经绕组固定部件(中心环)进入转子端部后分为两路,在距离转子端部34、70 mm处每匝导线两侧开设进风口,一路经70 mm进风口流至端部转子槽中心处再经月亮槽汇入气隙通道内冷却空气从出风口流出;另一路经34 mm进风口进入轴径向转子槽经对称面处转子槽楔出风口汇入气隙再经出风口流去。端部包括导线内风道和导线外风道,外风道为分压挡板外表面、转子槽外表面与空气形成的对流传热区域,内外风道表面与空气之间对流传热,如图4所示。

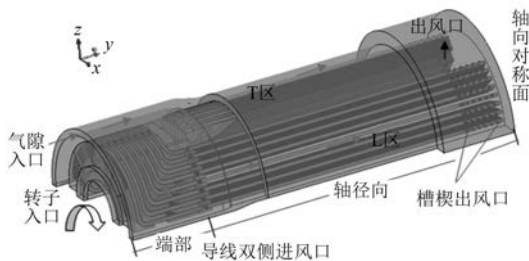


图4 计算域(流体)物理模型

1.1.2 网格划分

对流体域与固体域物理模型划分网格。为了

提高计算精度,全部采用结构化网格。固体域部件包括转子、压紧环、导线、槽楔;流体域包括端部外流道、导线内流道、气隙。因为模型尺寸较大,难以进行全域网格无关性验证,所以对单个转子绕组内风道进行了网格无关性验证,网格数量和精度满足计算要求。最终确定该通风系统流场模型总网格数为3501万,固体域网格总数为34万,总网格达到3535万,如图5所示。

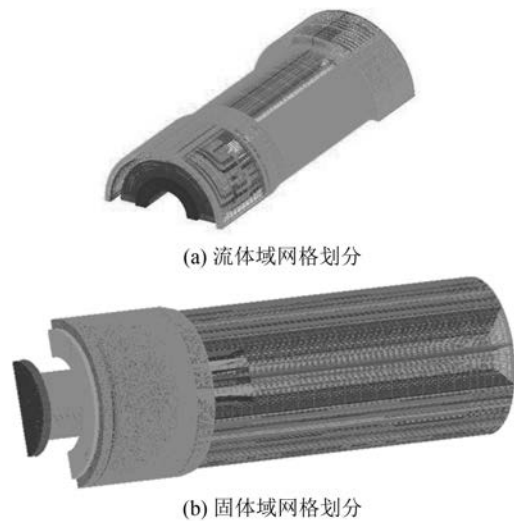


图5 网格划分示意图

1.2 数学模型

将计算域内空气视为不可压缩流体。由于转子空气入口雷诺数大于2300,空气流动处于湍流状态。在旋转坐标系,湍流时质量守恒为

$$\nabla(\rho u_r) = 0 \tag{1}$$

动量守恒方程为

$$\nabla(\rho u_r \times u_r) + \rho(2\omega \times u_r + \omega \times \omega \times r) = -\nabla p + \nabla \tau + F \tag{2}$$

流动过程中绝对速度矢量 \mathbf{u} 与相对速度矢量 \mathbf{u}_r 的关系为

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_r + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r} \quad (3)$$

能量守恒方程为

$$\nabla(\rho \mathbf{u} T) = \nabla \Gamma(\text{grad} T) + S_T \quad (4)$$

式中: ρ 为密度; $\boldsymbol{\omega}$ 为旋转角速度矢量; \mathbf{r} 为微元体的矢径; $\rho(2\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{u}_r + \boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})$ 为科里奥里力; τ 为表面黏性力; \mathbf{F} 为体积力; Γ 为热扩散率; $\text{grad} T$ 为温度梯度; S_T 为导线散热强度。

采用标准 $k-\varepsilon$ 模型输运方程^[8]对转子湍流数学模型进行计算研究。

1.3 单值性条件

电机主要工作部件包括压紧环、前挡板、转子、绝缘材料、转子槽楔、绕组导线,定常热导率分别为 14、0.26、60.5、0.26、150、393 W/(m·K)。绕组导线的散热为电机通风系统的主要热源,表达式为

$$P = I^2 \rho [1 + \alpha_{20}(T - T_{20})] / A_{Cu}^2 \quad (5)$$

式中: P 为热损耗强度; I 为绕组电流, $I = 1\ 547.9\ \text{A}$; ρ 为电阻率, $\rho = 1.78 \times 10^{-8}\ \Omega \cdot \text{m}$; α_{20} 为导体电阻温度系数, $\alpha_{20} = 1/254.5\ (1/\text{K})$; T 为绕组电流温度; T_{20} 为参考温度, $T_{20} = 20\ \text{℃}$; A_{Cu} 为铜导线横截面积, $A_{Cu} = 277.33 \times 10^{-6}\ \text{m}^2$ 。

以上数据来自某制造企业内部技术资料。

该电机在额定工况运行时,转子旋转速度为 3 000 r/min,转子入口边界速度为 32.41 m/s,射入角为 60°,气隙边界为 41.41 m/s,射入角为 45°,气隙出风口的压力由实际测定的数据为准,轴向对称面设为对称边界,周向对称面设为周期性边界。在方程求解过程中,应用分离隐式法,借助 SIMPLE 算法对速度压力耦合方程进行计算求解,去残差为 1×10^{-3} 可得稳定的网格独立收敛解。该模型传热流动结构复杂网格数量较多,收敛十分困难,因此在进行多次尝试之后,确定如下条件: (1)时间尺度 0.000 1; (2)对流体及固体设置初始温度,流体初始温度 20 ℃,固体初始温度 40 ℃。

2 计算结果分析

2.1 绕组导线内流体温度分布

图 6 所示为绕组导线温度。由图 6 可以看出,导线内流体的温度最低为 58.39 ℃,最高温度为 129.10 ℃,在端部及轴径向流体沿流动方向温

度升高,端部绕组导线内温度明显低于轴径向,转子中心对称面处为高温区;轴径向高温区分布在绕组 $T_3 \sim T_8$ 、 $L_7 \sim L_8$ 上,轴径向 T 区的高温区范围大于 L 区,这是由转子转动造成的。

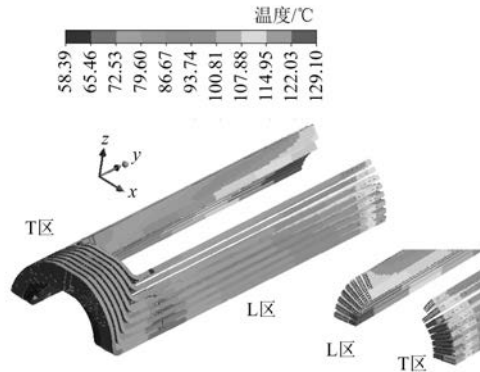


图 6 绕组导线温度

2.2 轴径向导线内流量分布

图 7 所示为轴径向导线内流量。由图 7(a)可以看出,导线平均流量的径向分布呈依次增大的趋势,但受导线通流面积差异的影响沿 $R_1 \sim R_4$ 方向流量发生跳动但趋势向上,沿 $R_5 \sim R_{12}$ 方向依次增大;绕组 T_1 、 L_1 各圆周处导线内流量明显大于 $T_2 \sim T_8$ 、 $L_2 \sim L_8$,这是绕组导线数量影响的结果;沿 $R_1 \sim R_4$ 方向,绕组 $T_1 \sim T_4$ 、 $L_1 \sim L_4$ 的流量一般在平均流量以上,其他绕组导线内流量则在平均流量以下。由图 7(b)可以看出,导线平均流量的周向分布,在 $R_1 \sim R_4$ 圆周部分沿 $T_2 \sim T_8$ 、 $L_2 \sim L_8$ 先降低然后升高,在 $R_5 \sim R_{12}$ 圆周部分沿 $T_1 \sim T_8$ 、 $L_1 \sim L_8$ 先

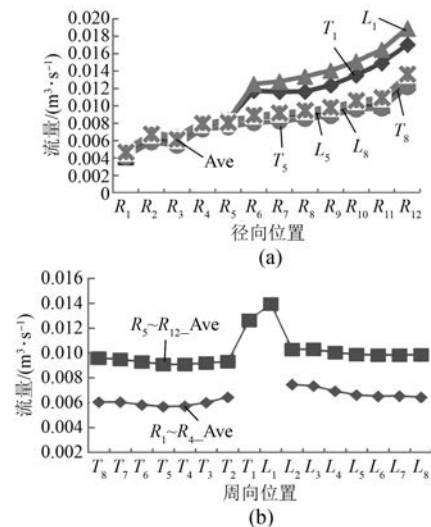


图 7 轴径向导线内流量

降低后增高,且 T_1 、 L_1 流量增幅较大;受转子转动的影响,L 区导线平均流量分别大于 T 区。在区域(T 区, A_1) 导线 $D(T_7, R_4)$ 具有最大流量,为 $0.0079 \text{ m}^3/\text{s}$;在区域(L 区, A_1) 导线 $D(L_2, R_4)$ 具有最大流量,为 $0.0091 \text{ m}^3/\text{s}$;在区域(T 区, A_2) 导

线 $D(T_1, R_{12})$ 具有最大流量,为 $0.0170 \text{ m}^3/\text{s}$;在区域(L 区, A_2) 导线 $D(L_1, R_{12})$ 具有最大流量,为 $0.0189 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

2.3 轴径向导线流体温度分布特点

图 8 所示为轴径向导线流体温度。

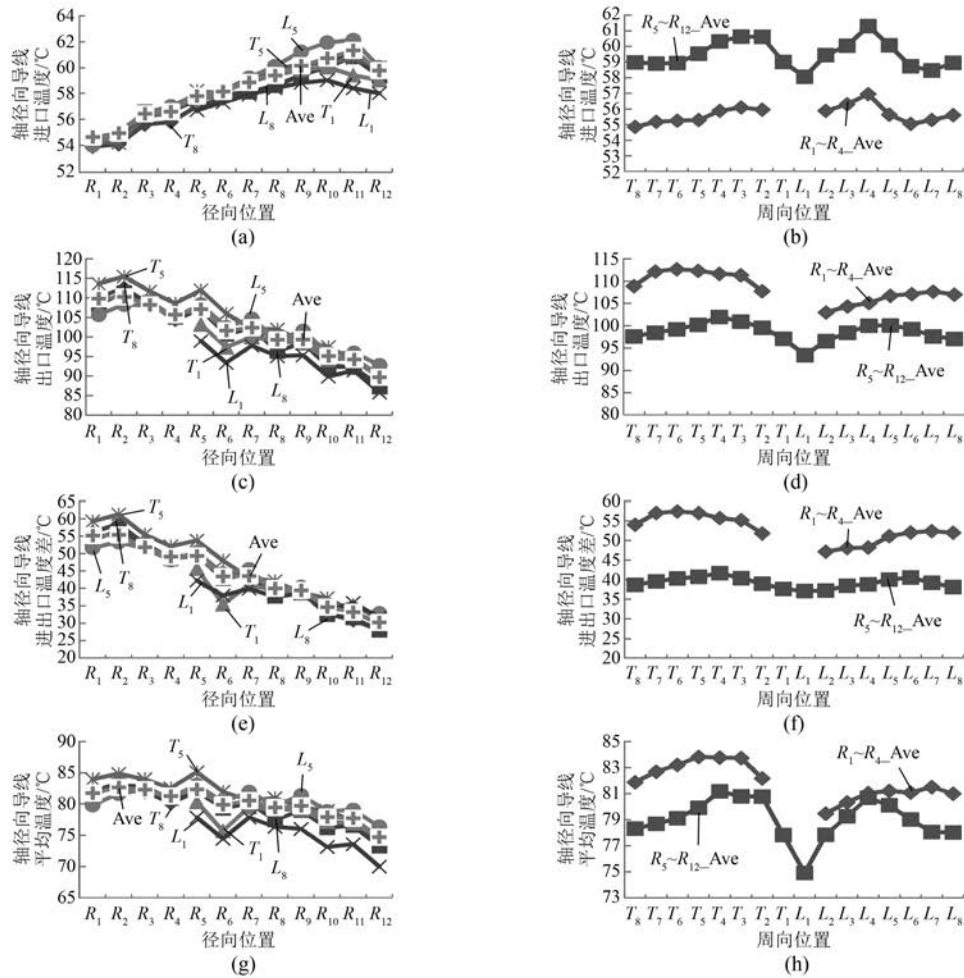


图 8 轴径向导线流体温度

由图 8(a) 可以看出,导线流体进口温度的径向分布,平均进口温度沿径向 $R_1 \sim R_{12}$ 先升高后降低,最高进口温度出现在 R_{11} 。这是由于冷却空气进入转子后沿径向向外辐射流动,在流动过程中冷却空气与端部导线外壁面进行对流传热温度不断升高,中心环内侧冷却空气与外侧气隙冷却空气构成典型的传热过程,内侧冷却空气向气隙散热,温度降低。由图 8(b) 可以看出,导线流体平均进口温度的周向分布,在 $R_5 \sim R_{12}$ 圆周部分,其进口温度沿 $T_1 \sim T_8, L_1 \sim L_8$ 先升高后降低然后再升高,呈类“M 型”分布;在 $R_1 \sim R_4$ 圆周部分沿 $L_2 \sim L_8$

先升高后降低然后再升高与 $R_5 \sim R_{12}$ 基本相同,而 T 区则不同轴径向温度不断降低。图 8(c) 表示导线流体出口温度的径向分布,其平均出口温度沿径向 $R_1 \sim R_{12}$ 波动降低,最高出口温度出现在 R_2 ,表明气隙冷却空气冲刷转子表面及槽楔冷却效果明显。图 8(d) 表示绕组导线流体平均出口温度的周向分布,在 $R_5 \sim R_{12}$ 圆周部分沿 $T_1 \sim T_8, L_1 \sim L_8$ 先升高后降低,呈“M 型”分布;在 $R_1 \sim R_4$ 圆周部分,沿 $T_2 \sim T_8, L_2 \sim L_8$ 也是先升高后降低,这是由于极中心转子表面受气隙冷却流体冲刷冷却,效果最好。热量传递分为两路,一路为热量沿

$T_4 \sim T_1, L_4 \sim L_1$ 在上层传递; 还有一路沿 $T_8 \sim T_1, L_8 \sim L_1$ 在下层传递。导线流体进出口温度差、平均温度沿 $R_1 \sim R_{12}$ 的径向分布均为波动降低, 与出口温度大致相同, 且最高温差与最高平均温度均出现在 R_2 处, 如图 8(e)、图 8(g) 所示; 在周向分

布上均呈“M 型”分布, 与出口温度基本, T 区导线流体温度分别大于 L 区导线, 平均温度最高出现在 T_5 , 如图 8(f)、图 8(h) 所示。

2.4 平均温度不均匀性分析

图 9 所示为轴径向导线流体平均温度方差。

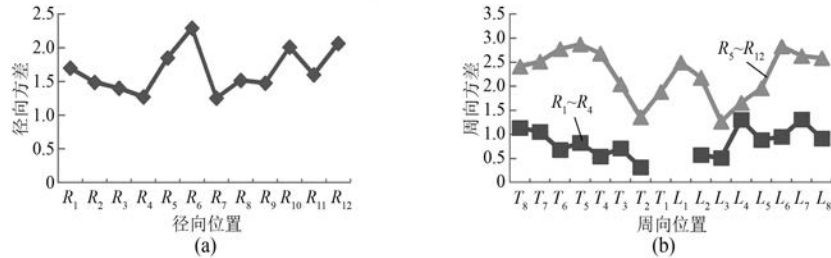


图 9 轴径向导线流体平均温度方差

图 9(a) 为导线平均温度的径向方差, 波动范围为 1.26~2.30; 图 9(b) 为导线平均温度的周向方差, 在 $R_1 \sim R_4$ 圆周部分沿 $L_2 \sim L_8, T_2 \sim T_8$ 为波动上升, 波动范围为 0.32~1.31; 在 $R_5 \sim R_{12}$ 圆周部分沿 $T_1 \sim T_8, L_1 \sim L_8$ 先降低后升高然后再降低, 波动范围为 1.26~2.87。导线的径向、周向位置分布对平均温度不均匀性的影响基本相当, 而导线通流面积对其影响较大。

导线流体温度不均匀性的影响, 通过方差分析发现径向、周向位置分布对平均温度不均性的影响差异较小, 而导线通流面积对其影响较大; 转子转动对导线内流量及温度在 T 区及 L 区的影响较大。

2.5 绕组 T_5 温度云图

图 10 所示为轴径向绕组 T_5 导线温度云图。该绕组导线的温度沿流体流动方向不断升高, 沿径向温度不断降低, 导线进口最低温度为 59.26 °C, 最高温度为 129.10 °C, 在安全范围内。

致谢 作者对 Alstom (瑞士) 公司对于本文工作的支持表示感谢。

【参考文献】

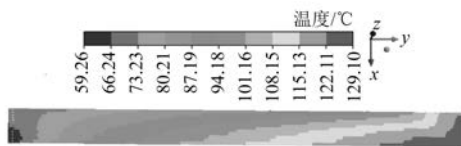


图 10 轴径向绕组 T_5 导线温度云图

3 结 语

针对 32 转子槽的大型空冷核电汽轮发电机, 进行了流场数值模拟。本文主要探究了轴径向绕组导线内流量, 导线流体的进出口温度、进出口温度差、平均温度在径向与周向的分布特点, 发现导线最大流量为 $0.0189 \text{ m}^3/\text{s}$ 位于 $D(L_1, R_{12})$, 径向圆周 R_2 、周向绕组 T_5 为导线流体危险位置, 最高温度达 129.10 °C, 在电机正常工作范围内。在此基础上, 分析了径向、周向位置及通流面积差异对

[1] 汪耕, 李希明. 大型汽轮发电机设计、制造与运行 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2000: 146-148.
 [2] 丁舜年. 大型电机的发热与冷却 [M]. 北京: 科学出版社, 1992: 18-23.
 [3] 王超, 刘传坤. 700MW 全空冷水轮发电机定子三维流场和温度场特征分析 [J]. 上海大中型电机, 2013(2): 16.
 [4] 杨志宾. 空冷汽轮发电机定子内流体流动与传热的数值模拟 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.
 [5] 李俊卿, 符建民, 张平平. 汽轮发电机水路堵塞时定子流体场和温度场的数值仿真 [J]. 高电压技术, 2012, 38(6): 1313.
 [6] 路义萍, 邓海燕, 付国敏, 等. 变频调速同步电机转子三维温度场数值模拟 [J]. 电机与控制学报, 2011, 15(6): 45.
 [7] 路义萍, 潘庆辉, 孙雪梅, 等. 湍流模型变化对汽轮发电机转子热流场影响 [J]. 电机与控制学报, 2014, 18(11): 72.
 [8] 王福军. 计算流体力学分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 120-123.