

DOI: 10.7652/xjtuxb201912015

空冷水轮发电机定子冷却结构设计与分析

贺景运, 边旭, 梁艳萍

(哈尔滨理工大学电气与电子工程学院, 150080, 哈尔滨)

摘要: 为改善空冷水轮发电机的通风冷却效果,研究了电机定子冷却结构的设计与性能分析方法。以一台 250 MW 空冷水轮发电机为例,考虑定子绕组换位、槽钢、槽楔形状和各通风沟间的相互影响等因素,构建了定子流固耦合的物理模型和数学模型;采用数值法计算了每根股线的损耗;基于流体传热理论和定子温升特点,通过改变电机内定子铁心和通风沟的结构尺寸,提出了 3 种定子冷却结构;对比不同结构下求解区域内流体场和温度场,给出了电机定子最优的冷却结构。最后,通过实验对建模的准确性和方法的可行性进行验证,结果表明,相比通风沟轴向长度,铁心段轴向长度对定子槽内绕组温升影响更大,合理调整电机定子通风沟和铁心段的数量和轴向长度,可有效降低槽内换位绕组的最高温度。

关键词: 空冷水轮发电机;冷却结构;换位绕组;流体场;温度场

中图分类号: TM312 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)12-0111-09

Design and Analysis for Stator Cooling Structure of Air-Cooled Hydrogenerator

HE Jingyun, BIAN Xu, LIANG Yanping

(School of Electrical and Electronic Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: To improve the ventilation cooling effect of air-cooled hydrogenerators, the design and performance analysis methods of the stator cooling structure are investigated. Taking a 250 MW air-cooled hydrogenerator for example, the factors of stator winding transposition, channel steel, slot wedge shape and the interaction among ventilation ditches are considered to construct the physical model and mathematical model of stator fluid-solid coupling, and the loss of each strand is numerically evaluated. According to fluid heat transfer theory and temperature rise characteristics of the air-cooled hydrogenerator stator, three design strategies are proposed by changing the structural dimensions of the stator cores and the ventilation grooves in the generator. Comparing the fluid and temperature fields in the solution region for different structures, the optimal cooling structure of the generator stator is obtained. The accuracy of the model and the feasibility of the method are experimentally verified. It is shown that the axial length of the core segments exerts a greater influence on the temperature rise of the windings in the stator slot than the axial length of the ventilation grooves does; the highest temperature of the transposition winding in the slot can be effectively reduced by adjusting the number and axial length of stator ventilation grooves and core sections reasonably.

Keywords: air-cooled hydrogenerator; cooling structure; transposition winding; fluid field; temperature field

水轮发电机是水能转化为电能的核心设备之一,在实际电力生产中得到了广泛使用。随着水轮发电机容量日益增大,尤其空冷水轮发电机极限容量日益增大^[1],电机温升问题日益严重,这严重威胁电机的稳定性、安全运行和使用寿命^[2]。空冷水轮发电机定子最高温度出现在轴向中心区域,而大多数空冷水轮发电机定子各通风沟冷却空气流量均匀分配,没有考虑定子温升分布规律。为保证工业生产的顺利进行,探讨电机温升问题及其冷却方法是十分必要的。

实际上,电机温升是多因素彼此作用的结果,发电机定子是电机主要热源,尤其定子绕组产生的环流损耗会使绕组温升不均匀、存在局部过热点和绝缘存在击穿的危险^[3]。实际工程一般采用绕组特定换位减少环流损耗,研究证实大型电机定子温度场计算时,准确计算绕组局部过热点须考虑绕组换位路径^[4]。另一方面,物体形状对流体场影响巨大。研究表明,计算大型电机流体场时,为准确计算定子流体场须应考虑槽钢、槽楔形状等扰流作用^[5-6]。符合实际运行情况仿真模拟,对于解决存在的问题更有益。因此,针对空冷水轮发电机,迫切需要综合考虑定子绕组换位路径、槽钢、槽楔形状和各通风沟相互影响等因素,准确计算定子绕组温度场和设计新的冷却结构,以期合理分配定子各通风沟内的冷却空气,从而有效解决电机温升的实际问题。

目前,许多学者对电机定子流体场和温度场进行了广泛的研究^[4-9]。文献[6]以一台大型汽轮发电机为例,研究了槽钢高度、材料对定子流体场和温度场的影响。文献[7]以一台中型高压电机为例,研究了槽钢近轴端距离对定子流体场和温度场的影响。文献[8]以一台空冷水轮发电机为例,研究了冷却空气入射角对定子流体场和温度场的影响。文献[4,9]以空冷水轮发电机为例,研究了定子绕组换位路径对定子温度场的影响。但由于大型电机结构十分复杂,文献[6-8]忽略了定子绕组换位路径等因素,文献[4,9]忽略了槽钢和槽楔形状等对流体场的扰流作用。

在降低大型电机损耗方面,文献[10]以水轮发电机定子的 0°/360°/0°空换位绕组为例,提出了一种新的绕组换位方式。文献[11]以一台空冷发电机为例,通过加深加宽定子槽和增加股线数,降低了绕

组的环流损耗。在大型电机冷却结构设计方面,文献[12-13]分析了定子铁心段长度和数量对定子流体场和温度场影响。综上所述,国内外学者在对大型电机定子流体场和温度场研究时,很少综合考虑定子绕组换位路径、槽钢、槽楔形状和各通风沟相互影响等因素,在此基础上对定子冷却结构设计的研究甚少,这与实际情况偏差较大,无法满足日益严重的温升问题的解决。因此,综合考虑定子绕组换位路径、槽钢、槽楔形状和各通风沟相互影响等因素,对定子冷却结构设计具有重要理论价值和工程意义。

本文以一台 250 MW 空冷水轮发电机为例,综合考虑定子绕组换位路径、槽钢、槽楔形状和各通风沟相互影响等因素,构建了水轮发电机定子流体传热的三维模型。通过改变定子通风沟、铁心段的数量和长度,对空冷水轮发电机定子冷却结构进行设计。采用流固耦合方法,对不同结构的水轮发电机定子流体场和温度场进行分析,并用实验验证了方法的可行性和模型的精确性。

1 定子模型及边界条件

1.1 定子流体传热物理模型与基本假设

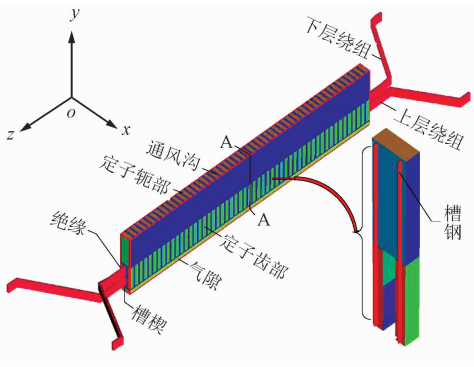
1.1.1 物理模型 以一台 250 MW 空冷水轮发电机为例,其基本参数见表 1。

表 1 电机的基本参数

参数	数值	参数	数值
额定容量/MW	250	定子铁心外径/mm	13 400
额定电压/V	15 750	绕组轴向长度/mm	3 112.6
气隙/mm	34	额定转速/(r · min ⁻¹)	115.4
定子通风沟数	52	定子铁心内径/mm	12 610
总风量/(m ³ · s ⁻¹)	128	铁心长度/mm	1 902

为不影响计算结果和减少计算量,取定子周向两个半齿、径向半个铁心段和轴向整个绕组为求解域,如图 1 所示, x 为周向, y 为径向, z 为轴向。

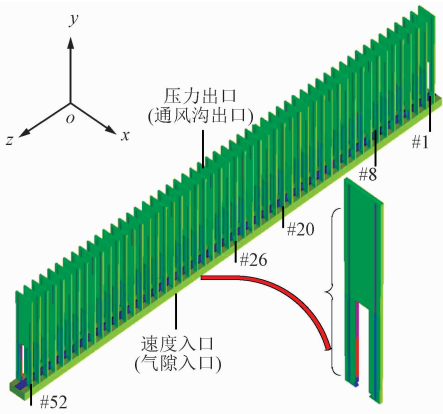
温度场求解模型见图 1a。定子绕组采用 360°全换位,其部分槽内换位绕组结构见图 1b。发电机以常用的双路径向无风扇系统冷却,求解域内冷却空气从气隙到径向通风沟,流体场求解模型见图 1c, #1~#52 为定子通风沟编号。股线编号和槽楔形状见图 1d。



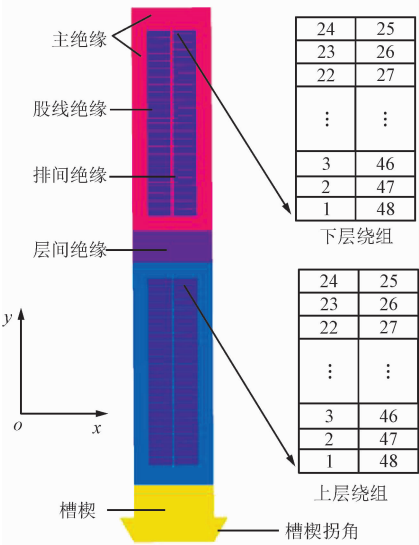
(a)温度场求解模型



(b)槽内换位绕组局部结构



(c)流体场求解模型



(d)股线编号和槽楔形状

图 1 定子流体传热模型

1.1.2 基本假设 由于所研究的空冷水轮发电机定子结构复杂,为简化求解模型,进行如下假设:

- (1)冷却空气均匀且径向通过气隙入口;
- (2)因为定子风速远小于声速,将定子流体看成是不可压缩流体;
- (3)股线绝缘、层间绝缘和排间绝缘的热性能都与主绝缘相同;
- (4)定子通风沟流体场采用紊流模型求解,忽略流体浮力和重力的影响。

1.2 数学模型

1.2.1 流体流动的基本控制方程 当流体为不可压缩定常流动时,需满足质量、动量和能量守恒方程,分别如下^[14]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \tag{1}$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u u) &= -\frac{\partial(P)}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + F_x \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v u) &= -\frac{\partial(P)}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + F_y \\ \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w u) &= -\frac{\partial(P)}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + F_z \end{aligned} \right\} \tag{2}$$

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \text{div}(\rho u T) = \text{div}\left(\frac{\lambda}{c_p} \text{grad} T\right) + S_T \tag{3}$$

式中:ρ为密度;t为时间;u、v和w分别为u在x、y和z方向的速度;P是微元体的压力;τ_{xx}、τ_{xy}和τ_{xz}等是微元体上黏性应力τ的分量;F_x、F_y和F_z是微元体的体力;c_p为比定压热容;T为介质温度;λ为流体的导热系数;S_T为黏性耗散项。

1.2.2 湍流流动控制方程 为模拟湍流流动,本文采用标准k-ε模型模拟不可压缩流体的湍流流动,其方程为^[14]

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k \tag{4}$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{1\epsilon} \epsilon G_k}{k} - \frac{C_{2\epsilon} \epsilon^2 \rho}{k} \tag{5}$$

式中:k为湍动能;ε为耗散率;μ为流体动力黏度;u_i和μ_t分别为时均速度和湍动黏度;G_k为由于平均速度梯度引起的湍动能k的产生项;G_b为由于浮力引起的湍动能k的产生项;C_{1ε}和C_{2ε}都为经验常数;σ_k和σ_ε分别为湍动能k和耗散率ε对应的Prandtl数。

1.2.3 传热方程 为描述定子温度随空间和时间

的变化规律,由傅里叶导热与能量守恒定律构建了如下传热方程

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z}\right)=-q$$

(6)

式中： λ_x 、 λ_y 和 λ_z 分别为固体介质沿 x 、 y 和 z 轴的导热系数； q 为固体介质单位体积的发热率。

1.3 边界条件

根据水轮发电机的通风结构及传热特性,认为通风沟和气隙是风路入口与出口的分界面,见图 1,计算区域的边界条件如下。

(1)以气隙入口为速度入口,入口只施加 1.7 m/s 径向风速,风的温度为 40 ℃。

(2)通风沟出口为 1 标准大气压的压力出口。

(3)垂直于周向的铁心两侧截面为绝热面,求解域其余外边界为散热面。与流体相交的散热面的换热系数由流固耦合法自动求得,定子端部和铁心外圆处的换热系数分别为^[15]

$$\alpha_c=\frac{1+\sqrt{v_c}}{600}\times 10^4$$

(7)

$$\alpha_0=40$$

(8)

式中： $v_c=(0.1\sim 0.2)\tau$, τ 为极距。

2 定子热源计算和冷却结构设计

2.1 定子热源计算

因为槽钢涡流损耗很小,不计槽钢损耗。借鉴文献[16]中定子换位绕组三维建模和数值法,考虑绕组换位路径,计算了电机额定工况时定子 360°全换位绕组的损耗,包括欧姆损耗、涡流损耗和环流损耗,再将损耗转化为损耗密度。确定绕组电密就可以确定每根股线的热源

$$P_{av}=\sum_{i=1}^E\int_{V_i}\frac{1}{2}\rho(|J_{xm}|^2+|J_{ym}|^2+|J_{zm}|^2)dV$$

(9)

式中： P_{av} 是股线热源； E 是剖分网格 V_i 的总数； J_{xm} 、 J_{ym} 和 J_{zm} 分别为 x 、 y 和 z 方向的电密。每根股线损耗密度分布见图 2。

借鉴文献[17]的解析方法,计算了电机额定工

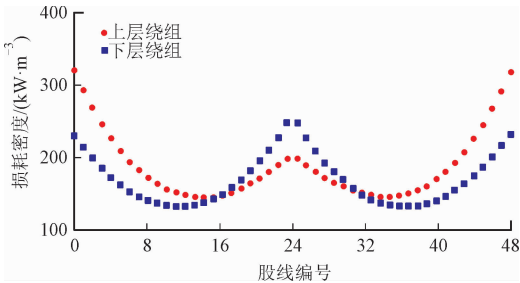
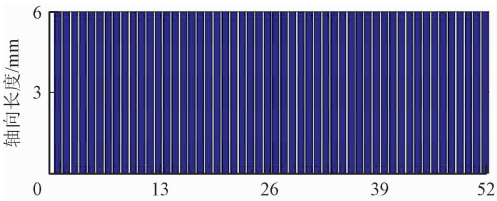


图 2 股线损耗密度分布

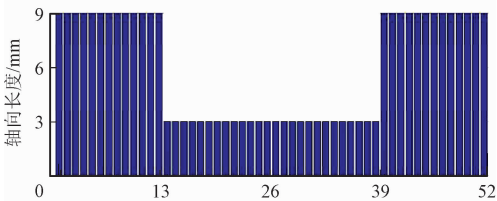
况下定子齿部和轭部的损耗,包括基本铁耗、附加损耗和三次谐波磁动势损耗,再将损耗转换成损耗密度。定子齿部和轭部的损耗密度分别为 71 947.83 W/m³ 和 30 715.63 W/m³。

2.2 定子冷却结构设计

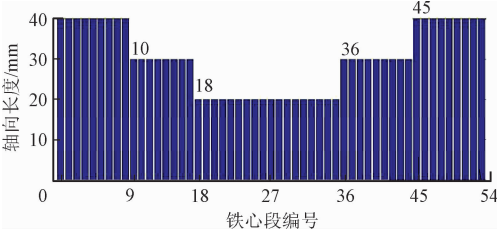
众所周知,大型空冷电机定子轴向中间区域散热性能较差,造成该区域温度显著高于其他部位。因此,在保证铁心长度和有效长度不变的前提下,按增加该区域冷却空气速度和散热面积及降低损耗 3 个原则,提出 3 种定子冷却结构。各定子冷却结构的铁心段和通风沟轴向长度见图 3。



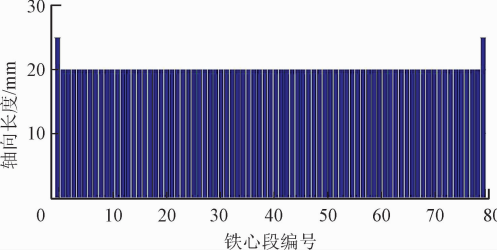
(a)原结构



(b)结构 1



(c)结构 2



(d)结构 3

图 3 铁心段和通风沟轴向长度

原结构:定子取 53 个铁心段,每段 30 mm;52 个通风沟,每段 6 mm。定子通风沟轴向长度和个

数见图 3a。

结构 1:保持定子铁心段数和轴向长度不变,改变定子通风沟轴向长度和数量。为增加定子最热区域风速,通风沟轴向长度取 9 mm 和 3 mm 两种,它们的个数都为 26 个。通风沟轴向长度和个数见图 3b。

结构 2:保持通风沟数和轴向长度不变,改变铁心段长度和个数。为降低定子最热区域的铁心热量,铁心段轴向长度分别取 40 mm、30 mm 和 20 mm,它们的个数分别 18 个、17 个和 18 个。定子各铁心段轴向长度和个数见图 3c。

结构 3:同时改变各定子铁心段和通风沟的个数和长度。为增大定子对流散热面积和尽可能地减少通风沟风量损失,每个通风沟的轴向长度都取 4 mm,铁心段轴向长度取 25 mm 和 20 mm 两种,它们的段数分别为 2 段和 77 段。定子各铁心段轴向长度和个数见图 3d。

因为绕组换位路径复杂,且股线绝缘厚度小,网格剖分难度大。为保证求解模型的计算精度和收敛性,只对槽内绕组和绝缘采用四面体网格剖分,其余部分皆采用六面体网格剖分。结构 1 求解模型的四面体网格和六面体网格数量分别为 55 121 734 个和 5 521 338 个。

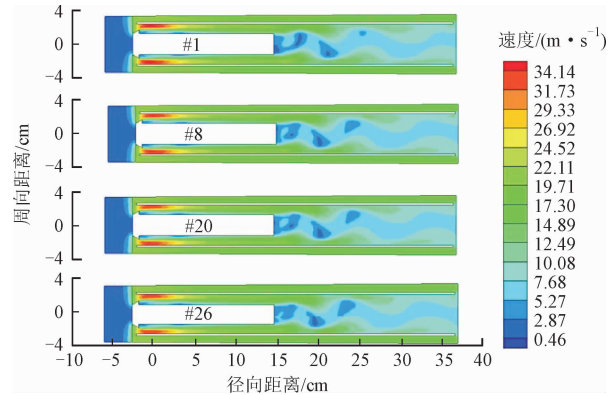
3 定子流体场和温度场分析

3.1 各结构的定子通风沟流体场和温度场分析

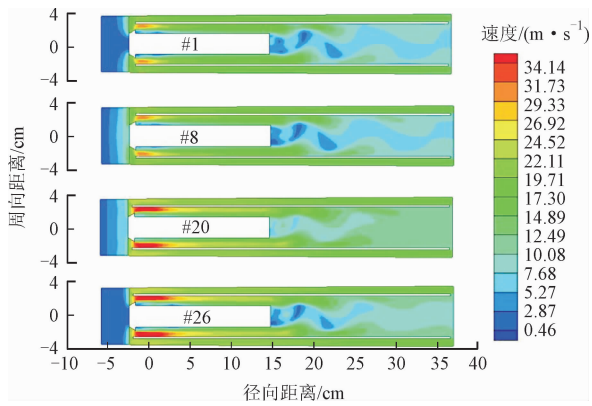
热对流、热传导与通风沟内冷却空气的速度和温度密切相关。因此,分析定子通风沟内冷却空气的速度和温度,引入径向通风沟轴向中心截面速度和温度分布,见图 4 和图 5。

对比图 4 和图 5,可以得出各结构通风沟内冷却空气速度和温度的变化规律。

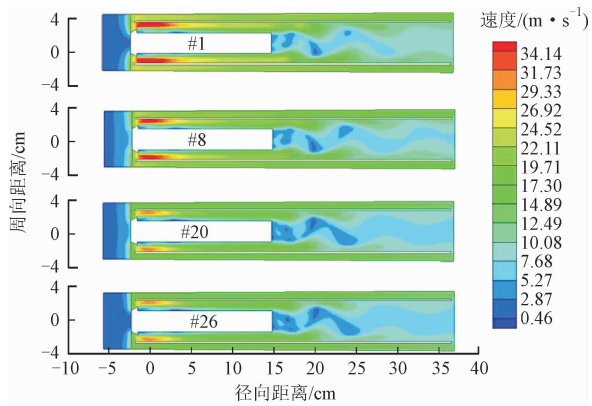
(1)定子铁心段和通风沟轴向长度均匀分布时,各通风沟内冷却空气的速度和温度相差不大。



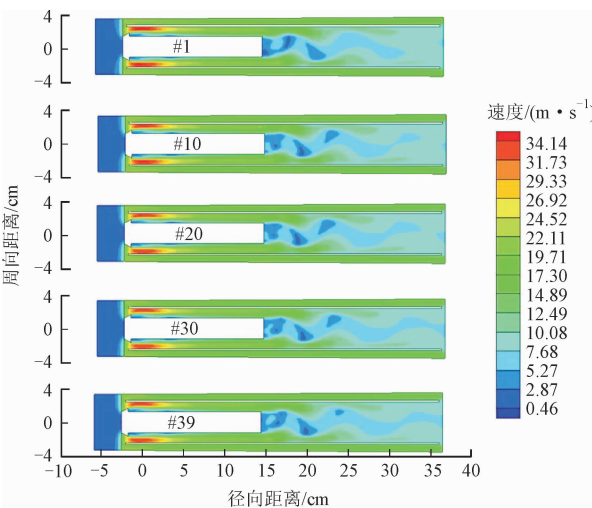
(a)原结构



(b)结构 1



(c)结构 2



(d)结构 3

图 4 径向通风沟中心截面风速分布

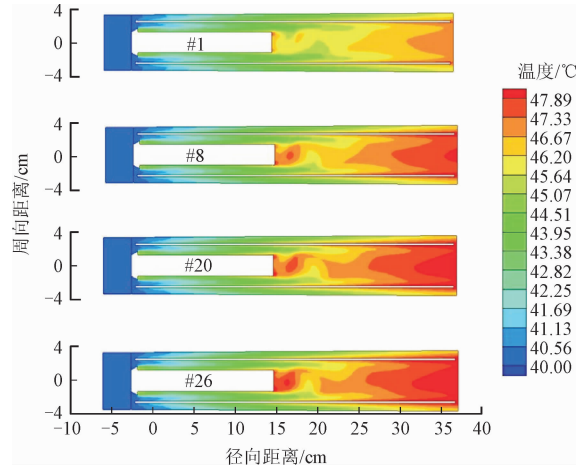
(2)定子结构对通风沟内冷却空气的速度和温度影响较大。结构 1 的 #26 通风沟上最大速度、温度分别为 39.90 m/s、53.83℃,比结构 1 的 #1 通风沟上最高速度、温度(31.12 m/s、46.82℃)分别高 22.01%和 13.02%。

结构 2 的 #26 上最高速度、温度分别为 30.87

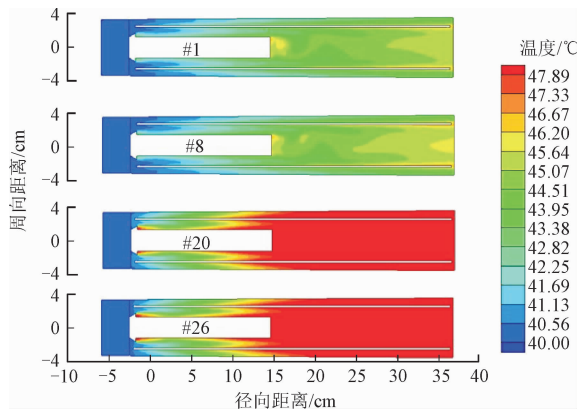
m/s、46.83℃，比结构 2 的 #1 通风沟上最高速度、温度（39.50 m/s、47.80℃）分别低 21.85%、2.03%。

(3)通风沟内冷却空气在换位绕组根部出现涡流，它的最大速度出现在定子齿部，最大温度出现在绕组根部和通风沟出口区域。

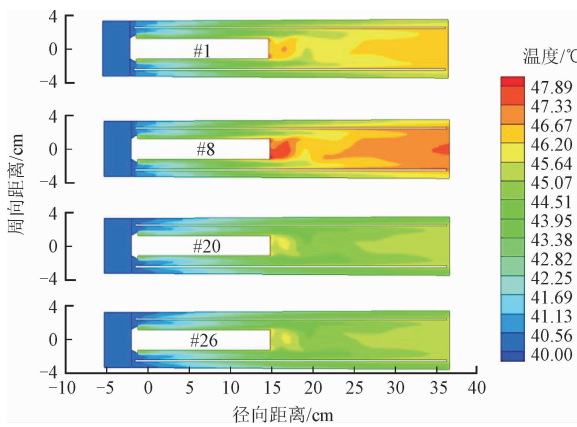
(4)通风沟内冷却空气的速度和温度变化趋势都基本关于槽中心线对称。



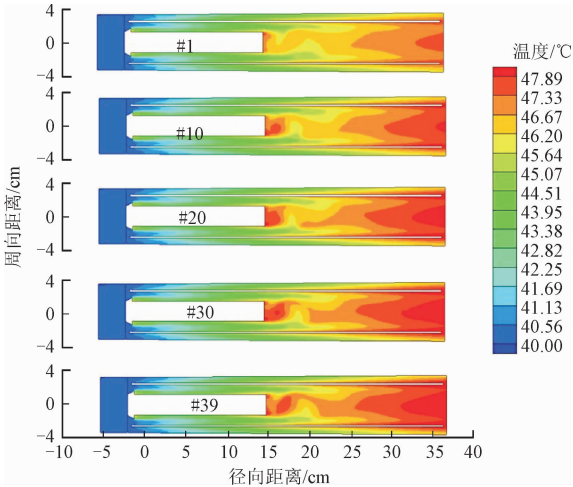
(a)原结构



(b)结构 1



(c)结构 2



(d)结构 3

图 5 径向通风沟中心截面温度分布

各结构通风沟内冷却空气的最高速度、温度见表 2 和表 3。

表 2 单个通风沟中心截面最大风速和温度

编号	参数	数值		
		原结构	结构 1	结构 2
# 1	速度/(m·s) ⁻¹	35.13	31.12	39.50
	温度/℃	47.89	46.82	47.80
# 8	速度/(m·s) ⁻¹	34.57	31.45	36.25
	温度/℃	48.70	46.98	48.73
# 20	速度/(m·s) ⁻¹	34.21	38.19	30.99
	温度/℃	49.03	54.44	46.86
# 26	速度/(m·s) ⁻¹	34.14	39.90	30.87
	温度/℃	49.28	53.83	46.83

表 3 结构 3 单个通风沟中心截面最大风速和温度

参数	数值				
	# 1	# 10	# 20	# 30	# 39
速度/(m·s) ⁻¹	35.08	34.74	34.38	34.25	34.17
温度/℃	47.96	48.42	48.7	48.73	48.75

由表 2 和表 3 可知：①定子铁心段轴向长度和个数不变，通风沟轴向长度在一定范围内变化时，该长度越小，通风沟内冷却空气的速度、温度都越大；②通风沟轴向长度和个数不变，铁心段轴向长度在一定范围内变化时，该长度越小，通风沟内冷却空气的速度、温度都越小。

3.2 各结构的定子温度场分析

为分析定子槽内绕组和铁心温度，以定子上层绕组的槽内第 1 根、第 12 根、第 24 根股线和定子齿

部为研究对象。定子绕组槽内股线的换位路径见图 6,定子上层绕组槽内股线和齿部温度分别见图 7 和图 8。

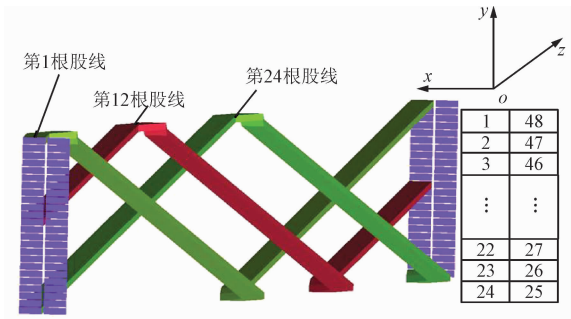
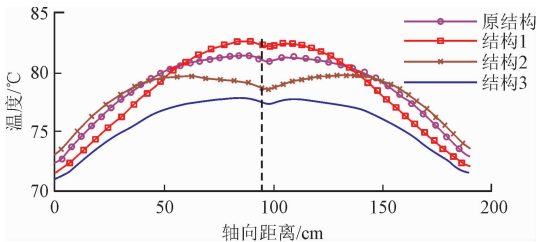
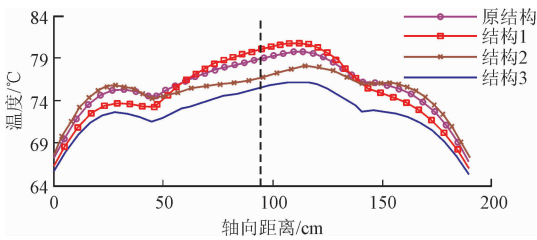


图 6 槽内部分股线的换位路径

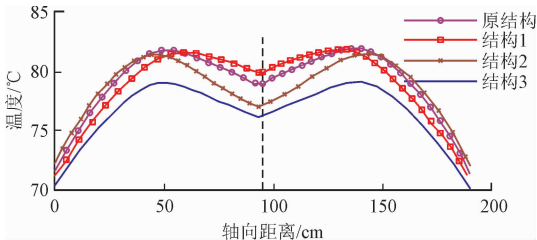
由图 7 可以看出:①槽内绕组最高温度出现在轴向中心区域;②定子铁心段的轴向长度对定子槽内绕组的温升分布影响较大,结构 1 增加定子槽内股线轴向温差,结构 2 降低槽内股线轴向温差;③结构 3 将槽内股线温度整体降低。



(a)第 1 根股线



(b)第 12 根股线

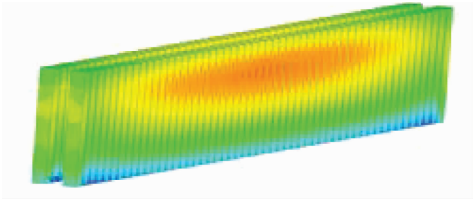


(c)第 24 根股线

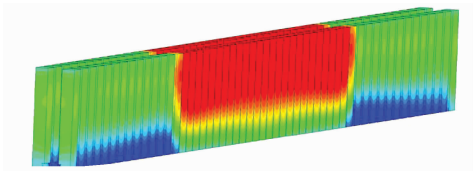
图 7 上层绕组槽内温度分布

由图 8 可以看出:①由轴向两边区域到轴向中心区域,原结构的定子齿部铁心温度逐渐增高;②定子铁心段轴向长度越大,该区域的定子齿部温度越

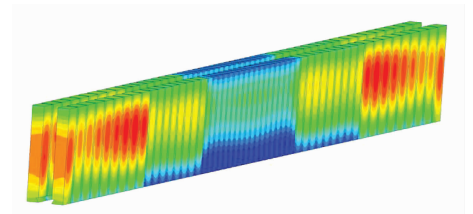
大;③保持定子铁心段长度不变,通风沟轴向长度越小,定子齿部温度越高;④结构 3 使定子齿部铁心温度整体下降。



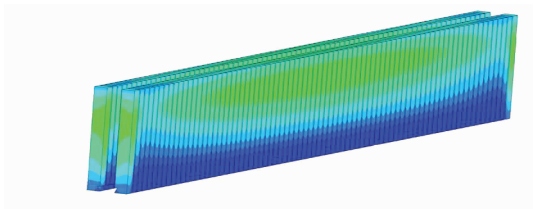
(a)原结构



(b)结构 1



(c)结构 2



(d)结构 3

图 8 定子齿部温度

各结构定子部件的最高温度,见表 4。由表 4 可知:①不同结构时,最高温度都位于上层绕组和绝

表 4 定子部件最高温度

位置	温度/℃			
	原结构	结构 1	结构 2	结构 3
冷却空气	50.76	55.80	49.92	49.66
上层绕组	81.48	82.68	79.78	77.89
下层绕组	78.80	80.70	77.39	75.20
上层绝缘	81.74	82.83	79.98	78.14
下层绝缘	78.96	80.87	77.53	75.44
定子齿部	57.26	60.63	58.23	53.11
定子轭部	54.91	59.13	53.99	51.58
定子槽钢	55.57	59.43	56.16	52.12

缘处;②结构 1 会增加定子的最高温度,结构 2 可适当降低定子的最高温度,结构 3 使定子最热点温度下降 3.59℃。

4 实验验证

为了验证本文模型的准确性和方法的可行性,对原结构的水轮发电机定子进行了温度测试实验。实验是基于埋设 PT100 温度传感器方法完成的,传感器槽内位置和测试点温度见图 9。

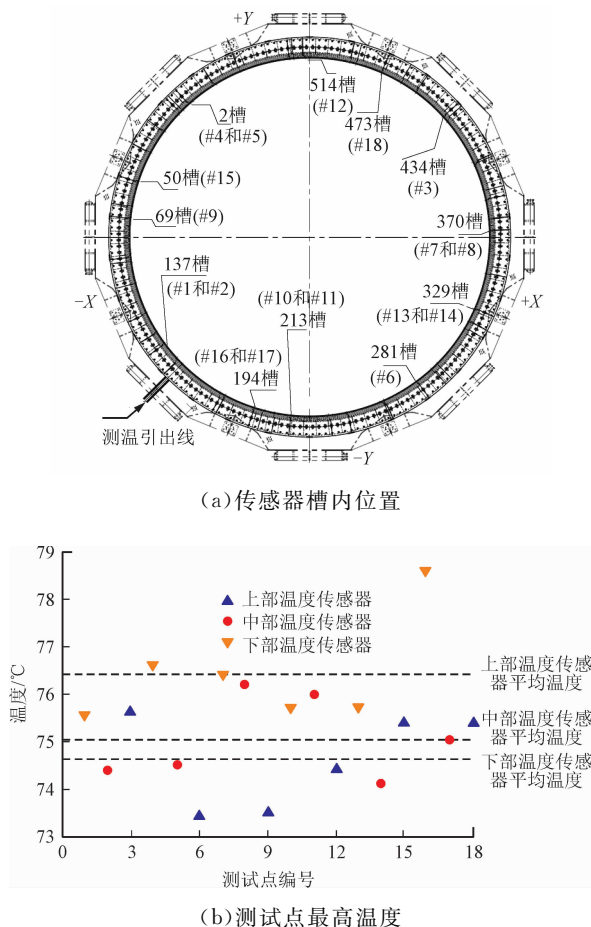


图9 传感器槽内位置和测试点最高温度

为减少测量误差:①将 18 组温度传感器分别埋设在不同定子槽中,位于轴向中心截面层间绝缘及其附近区域,见图 9a;②6 组安装在层间绝缘中间位置,6 组安装在靠近上层绕组的位置,6 组安装在靠近下层绕组的位置;③以 18 组传感器最高温度的平均值为实验值;④实验时间为 24 h,从零点开始每隔 1 h 记录一次传感器温度,其中上午 11 点时传感器温度最高,见图 9b。

由于绝缘轴向中心截面不同点上温度相差可能很大,为更准确提取原结构测试部位的温度值,在绝缘轴向中心截面的槽中心线上取采样点,以上层绕

组到下层绕组间的股线绝缘径向距离为采样范围,并以这些点的平均值为计算值。

计算和实验得到:发电机定子温度计算值为 74.6℃,实验值为 75.36℃;计算的相对误差为 1.1%,满足工程应用。

5 结论

本文以一台 250 MW 水轮发电机为例,综合考虑定子绕组换位路径、槽钢、槽楔形状和各通风沟相互影响等因素,构建定子流体传热模型。根据传热学和定子温升的分布规律,提出 3 种不同的定子冷却结构。采用流固耦合方法,计算各结构的流体场和温度场。通过对不同结构的定子流体场和温度场对比分析,得出以下结论。

(1)发电机原结构的温升计算结果与实验值相比,误差仅为 1.1%,说明所提的物理模型和数学模型可行。

(2)保持通风沟轴向长度和个数不变,设计定子轴向中心部位的铁心段轴向长度在一定范围变化,该尺寸越小,槽内绕组温升越均匀,同时定子的最高温度小幅降低。

(3)在一定范围内,增大通风沟数量、降低通风沟轴向长度,且尽量使定子各铁心段轴向距离相等的结构,能使各通风沟流量分配均匀,同时使定子最高温度最低。因此,结构 3 是定子最佳冷却结构。

(4)定子槽内绕组温升受铁心段轴向长度影响很大,而受通风沟轴向长度的影响较小。铁心段轴向长度越大,该区域槽内绕组温升越大。因此,合理分配定子铁心段轴向长度,可适当调整槽内绕组的温升。

参考文献:

- [1] 陈锋,李洪恺,覃鹏,等. 1 000 MW 空冷水轮发电机端部结构件涡流损耗优化探讨 [J]. 水力发电, 2018, 44(8): 74-77.
CHEN Feng, LI Hongkai, QIN Peng, et al. Study on the optimization of eddy current losses of end structures for 1 000 MW air-cooled hydro-generator [J]. Water Power, 2018, 44(8): 74-77.
- [2] ZHAN Yue, MCLOONE S, CAO Wenping, et al. Power loss and thermal analysis of a MW high speed permanent magnet synchronous machine [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(4): 1468-1478.
- [3] ISTAD M, RUNDE M, NYSVEEN A, et al. A re-

- view of results from thermal cycling tests of hydrogenator stator windings [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2011, 26(3): 890-903.
- [4] LIANG Yanping, WANG Ying, LIU Yang, et al. Derivation of temperature distribution of stator winding with transposed conductors for a large air-cooled hydrogenerator [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(8): 4764-4722.
- [5] 路义萍, 葛亚军, 王浩然, 等. 定子多风路空冷汽轮发电机流场模拟湍流模型验证与分析 [J]. 电机与控制学报, 2018, 22(5): 63-69.
- LU Yiping, GE Yajun, WANG Haoran, et al. Verification and analysis on turbulence model of flow field simulation for multiple ventilation stator ducts of air-cooled turbo generators [J]. Electric Machines and Control, 2018, 22(5): 63-69.
- [6] XIONG Bin, GU Guobiao, RUAN Lin, et al. Studies on the structure of radial ventilation channel to improve the cooling capacity of large turbo generator stator [C]// 17th International Conference on Electrical Machines and Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2014: 354-357.
- [7] 温嘉斌, 侯健, 于喜伟. 定子通风槽钢对中型高压电机内温度场的影响 [J]. 电机与控制学报, 2016, 20(8): 40-47.
- WEN Jiabin, HOU Jian, YU Xiwei. Influence of stator ventilation channel on the temperature field in the middle-size high voltage motor [J]. Electric Machines and Control, 2016, 20(8): 40-47.
- [8] DING Shuye, WANG Mengqi. Comparison investigation of fluid rheological characteristics effect on stator temperature field for large hydro-generator based on experiment [J]. The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, 2015, 34(1): 234-247.
- [9] ZHOU Chunlei, BIAN Xu, LIANG Yanping, et al. Numerical calculation and analysis of temperature field for stator transposition bar in hydro-generator [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2018, 125: 350-357.
- [10] 梁艳萍, 柳杨, 王晨光. 大型水轮发电机定子绕组新型组合换位方法分析 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(11): 3092-3100.
- LIANG Yanping, YANG Liu, WANG Chenguang. Analysis on a new method of the hydro-generators [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(11): 3092-3100.
- [11] 杜灿勋, 桂卫华, 周光厚. 大型全空冷水轮发电机定子线棒损耗和温度场综合计算 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(12): 111-119.
- DU Canxun, GUI Weihua, ZHOU Guanghou. Excessive losses and temperature field calculation of stator coil bars in air-cooled large hydro-generator [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(12): 111-119.
- [12] 丁树业, 郭保成, 孙兆琼. 永磁风力发电机通风结构优化及性能分析 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(9): 122-128.
- DING Shuye, GUO Baocheng, SUN Zhaoqiong. Ventilation structure optimization and performance analyses of permanent magnet wind generators [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(9): 122-128.
- [13] 霍菲阳, 李勇, 李伟力, 等. 大型空冷水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): 69-75.
- HUO Feiyang, LI Yong, LI Weili, et al. Calculation and analysis on stator ventilation structure of different optimum proposal in air-cooled turbogenerator [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(6): 69-75.
- [14] 王福军. 计算流体场动力学分析: CFD 软件原理与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 7-10, 121.
- [15] 白延年. 水轮发电机设计与计算 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1982: 191, 575-577.
- [16] LIANG Yanping, BIAN Xu, YANG Lichao, et al. Numerical calculation of circulating current losses in stator transposition bar of large hydro-generator [J]. IET Science, Measurement & Technology, 2015, 9(4): 485-491.
- [17] 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: 2-7.

[本刊相关文献链接]

- 左曙光, 刘明田, 胡胜龙. 考虑铁芯磁饱和的开关磁阻电机电感及转矩解析建模. 2019, 53(7): 118-125, 143. [doi: 10.7652/xjtuxb201907017]
- 徐兴, 徐新铮, 王峰, 等. 新型双电机行星耦合 PHEV 多目标补偿能量优化策略研究. 2019, 53(3): 125-134. [doi: 10.7652/xjtuxb201903018]
- 张岩岩, 耿海鹏, 周健, 等. 永磁同步电机转子偏心磁场解析计算. 2019, 53(2): 96-103. [doi: 10.7652/xjtuxb201902013]
- 谢颖, 张晓明, 华邦杰, 等. 并列式混合励磁复合电机的设计及其磁场调节特性. 2019, 53(2): 113-120. [doi: 10.7652/xjtuxb201902015]
- 杨坤, 解来卿, 王杰, 等. 后驱全电独立驱动-制动电动车横摆稳定性控制. 2019, 53(1): 44-51. [doi: 10.7652/xjtuxb201901006]

(编辑 杜秀杰)